

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA TEXTILNÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**LIBEREC 2011**

**MARTINA WIESNEROVÁ**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA TEXTILNÍ**

**TERMICKÉ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI**  
**POLYPROPYLENOVÉHO HEDVÁBÍ**

**THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYPROPYLENE**  
**MONOFILAMENT AND MULTIFILAMENT**

Vedoucí bakalářské práce: doc. Dr. Ing. Dana Křemenáková

Konzultant: Ing. Martina Košátková Hušková

Počet stran: 74

Počet příloh: 3

Počet tabulek: 5

Počet obrázků: 44

**LIBEREC 2011**

**MARTINA WIESNEROVÁ**

## **PROHLÁŠENÍ**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucí své bakalářské práce doc. Dr. Ing. Daně Křemenákové za odborné vedení a cenné připomínky. Dále bych chtěla poděkovat konzultantce Ing. Martině Košátkové Huškové za její pomoc, informace a vstřícnost, kterou mi poskytla při vypracování mé bakalářské práce. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu studia jak materiálně, tak psychicky.

## ANOTACE

Bakalářská práce se zabývá základními zákonitostmi při kroucení svazku nekonečných vláken a vlivem struktury svazku na geometrické, termické a mechanické vlastnosti polypropylenového hedvábí, především na tepelnou srážecí sílu, tepelnou sráživost, pevnost, tažnost, energii potřebnou pro přetrh a Youngův modul pružnosti PP multifilu. Dále se tato práce zabývá problematikou měření rychlosti zvuku procházejícího vlákny a souvislostmi s vnitřní strukturou vláken, resp. jejich orientací. Rešeršní část je věnována polypropylenovým vláknům, geometrickým, mechanickým a termickým vlastnostem vláken a vlákenných svazků. V experimentální části byly sledovány změny struktury vlivem seskání PP multifilu, který byl postupně přikrucován a výsledky byly porovnány s vybranými modely. Jednotlivé výsledky jsou uvedeny a následně porovnány v závěru práce.

**Klíčová slova:** polypropylen, monofil, multifil, vlastnosti příze, jemnost, tepelná srážecí síla, tepelná sráživost, rychlost zvuku vláken, orientace vláken

## ANNOTATION

The bachelor work is dealing with the basic principles of twist insertion to multifilament yarns. The influence of the structure on geometric, thermal and mechanical properties of polypropylene monofilament / multifilament yarn is studied with special emphasis on the thermal shrinkage force, thermal shrinkage, deforming force, elongation, the energy to break and the Young's modulus. Current work is dealing with problems of measuring the sonic velocity which is passing through the fibers and the link between the fine structure in fibers and their fine orientation. The experiment deals with PP fibers, geometric, mechanical and thermal properties of fibers and the fiber bundles. In the experimental part of this work, the changes of structure by twist contraction were studied for PP multifilament, with increasing twist level. The results were compared with selected models. All results are shown and compared in the end.

**Key word:** Polypropylene, monofilament, multifilament, yarns properties, fineness, thermal shrinkage force, thermal shrinkage, sound velocity through fiber, fiber orientation

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$a$	$[m^{-1} \text{ ktex}^{2/3}]$	Phrixův zákrutový koeficient
$Ap$	$[J]$	deformační práce do přetrhu
$\alpha_s$	$[m^{-1/3}]$	plošný Phrixův zákrutový koeficient
$C$	$[km/sec]$	rychlost zvuku orientovaného vlákna
$Ca$	$[m/s]$	rychlost zvuku ve vzduchu
$d$	$[mm^2]$	průměr vláken
$D$	$[mm^2]$	průměr svazku vláken
$de$	$[mm^2]$	ekvivalentní průměr vlákna
$D_s$	$[mm^2]$	substanční průměr svazku vláken
$E$	$[Pa]$	modul pružnosti vlákna
$Ep$	$[Pa]$	modul vlákna
$F$	$[N]$	absolutní pevnost v tahu
$Fr$	$[N/tex]$	síla do přetrhu vlákna
$f$	$[-]$	součinitel tření vlákna
$fa$	$[-]$	orientace nekystalických oblastí
$fk$	$[-]$	značí faktory krystalické orientace
$fl$	$[-]$	koeficient vlivu délky vláken
$fn$	$[-]$	koeficient vlivu počtu vláken
$fo$	$[-]$	celková průměrná orientace vláken
$K$	$[%/min^{-1}C^{-1}]$	citlivost max. rychlosti srážení
$fa$	$[-]$	závislost pevnosti vlákna na koef. zákrutu
$kp$	$[Pa]$	konstanta tlaku
$L$	$[km]$	délka vlákenného svazku
$lo$	$[mm]$	upínací délka
$ll$	$[mm]$	délka přikroucených vláken
$lp$	$[mm]$	max. vzdál. čelistí v okamžiku přetrhu
$ly$	$[mm]$	délka vláken
$m$	$[g]$	hmotnost vlákna
$M$	$[g]$	hmotnost vlákenného svazku
$n$	$[m^{-1}]$	otáčky zákrutového ústrojí

$OI$	[-]	počet přidaných ovinů
$R$	[N tex <sup>-1</sup> ]	poměrná pevnost v tahu
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	souhrnná plocha vláken ve svazku
$s$	[mm <sup>2</sup> ]	plocha příčného řezu vlákna
$Sc$	[mm <sup>2</sup> ]	celková plocha
$t$	[tex]	jemnost vlákna
$T$	[tex]	jemnost svazku vláken
$Tg$	[°C]	teplota skelného přechodu
$Tt$	[°C]	teplota tání
$Tv$	[°C]	teplota varu
$v$	[m min <sup>-1</sup> ]	odváděcí rychlost
$Vc$	[m <sup>3</sup> ]	celkový objem svazku vláken
$Vs$	[%/min]	max. rychlost srážení
$Vv$	[m <sup>3</sup> ]	objem vláken ve svazku vláken
$Z$	[m <sup>-1</sup> ]	zákrut vlákenného svazku
$\alpha$	[m <sup>-1</sup> ktex <sup>1/2</sup> ]	Köchlinův zákrutový koeficient
$\alpha_s$	[-]	plošný Köchlinův zákrutový koeficient
$sk\ \alpha$	[-]	plošný kritický zákrutový koeficient
$\alpha_k$	[m <sup>-1</sup> ktex <sup>-1/2</sup> ]	Köchlinův kritický zákrutový koeficient
$\alpha_y$	[°]	parametr sklonu k ose vlákna
$\beta$	[°]	úhel sklonu vláken v zakrouceném svazku vláken
$\Delta l$	[mm]	rozdíl délky zakrouceného a nezakr. vl. svazku
$\delta s$	[%]	seskání vlákenného svazku
$\varepsilon$	[%]	tažnost
$\mu$	[-]	zaplnění svazku příze
$\rho$	[kg.m <sup>-3</sup> ]	měrná hmotnost vláken
$\sigma p$	[Pa]	napětí do přetrhu
$\chi$	[-]	intenzita zákrutu
<i>apod.</i>		a podobně
<i>atd.</i>		a tak dále
<i>Obr.</i>		obrázek
<i>PP</i>		polypropylen

# OBSAH

PODĚKOVÁNÍ.....	4
ANOTACE.....	5
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	6
1. ÚVOD .....	10
2. REŠERŠNÍ ČÁST .....	11
2.1 POLYPROPYLEN (PP).....	11
2.1.1 VLASTNOSTI POLYPROPYLENOVÝCH VLÁKEN.....	12
2.1.2 POUŽITÍ POLYPROPYLENU.....	13
2.2 VLASTNOSTI VLÁKEN.....	13
2.2.1 JEMNOST A PRŮMĚR VLÁKNA.....	13
2.2.2 TVAR PŘÍČNÉHO ŘEZU VLÁKNA.....	14
2.2.2 PEVNOST , TAŽNOST, TAHOVÁ KŘIVKA VLÁKNA.....	15
2.2.3 MEZ PRUŽNOSTI A MEZ KLUZU VLÁKEN .....	17
2.2.4 PŘEDPĚTÍ .....	18
2.2.5 ŠÍŘENÍ A RYCHLOST ZVUKU, AKUSTICKÝ DYNAMICKÝ MODUL, ORIENTACE VNITŘNÍHO USPOŘÁDÁNÍ VE VLÁKNECH.....	19
2.3 VLASTNOSTI ROVNOBĚŽNÝCH A ZAKROUCENÝCH SVAZKŮ VLÁKEN.....	21
2.3.1 JEMNOST, SUBSTANČNÍ PRŮMĚR A POČET VLÁKEN VE SVAZKU .....	21
2.3.2 ZAPLNĚNÍ, IDEALIZOVANÉ TVARY PŘÍČNÝCH ŘEZŮ.....	22
2.3.3 ZÁKRUT, ZÁKRUTOVÝ KOEFICIENT SVAZKU VLÁKEN.....	24
2.3.4 SESKÁNÍ.....	28
2.3.5 PEVNOST A TAŽNOST VLÁKENÝCH SVAZKŮ .....	29
2.3.6 AKUSTICKÝ DYNAMICKÝ MODUL A ORIENTACE VE VLÁKNECH VLÁKENNÉHO SVAZKU .....	30
2.4 TERMICKÉ VLASTNOSTI VLÁKEN.....	30
2.4.1 TERMICKÁ ANALÝZA.....	30
2.4.3 CHOVÁNÍ POLYMERŮ VE VZTAHU K TEPLITĚ.....	32
2.4.4 MAXIMÁLNÍ, EFEKTIVNÍ A ZBYTKOVÁ TEPELNÁ SRÁŽIVOST .....	34
2.4.5 KINETICKÁ KŘIVKA SRÁŽENÍ, MAXIMÁLNÍ SRÁŽECÍ RYCHLOST.....	34
2.4.6 EFEKTIVNÍ, MAXIMÁLNÍ A ZBYTKOVÁ TEPELNÁ SRÁŽECÍ SÍLA .....	35
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	35
3.1 JEMNOST PŘÍZE.....	36
3.2 TVAR PŘÍČNÉHO ŘEZU PP MULTIFILU (viz. kapitola 2. 2. 2).....	36



3.4 ZÁKRUT MULTIFILU .....	36
3.5 TEPELNÁ SRÁŽIVOST, TEPELNÁ SRÁŽECÍ SÍLA .....	40
3.5.1 PŘÍSTROJ TST2 .....	40
3.5.2 POSTUP ZKOUŠKY .....	41
3.5.2.1 MĚŘENÍ TEPELNÉ SRÁŽIVOSTI PP MULTIFILU .....	41
3.5.2.2 ZPRACOVÁNÍ DAT TEPELNÉ SRÁŽIVOSTI.....	41
3.5.2.3 MĚŘENÍ TEPELNÉ SRÁŽECÍ SÍLY PP MULTIFILU .....	47
3.5.2.4 ZPRACOVÁNÍ DAT TEPELNÉ SRÁŽECÍ SÍLY .....	47
3.6 DYNAMICKÝ AKUSTICKÝ MODUL .....	50
3.6.1 POSTUP ZKOUŠKY .....	50
3.7 PEVNOST, TAŽNOST, TAHOVÉ KŘIVKY .....	52
4.ZÁVĚR.....	56
5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	57
6. SEZNAM PŘÍLOH .....	58

## 1. ÚVOD

Výroba textilu (příze, tkaniny či pleteniny) patří k nejstarším lidským dovednostem již od starověku. Vlna, len, pravé hedvábí a bavlna patří k nejstarším používaným textilním materiálům. Do počátků průmyslové revoluce se držela rukodělná výroba, ale technický pokrok zasahuje prakticky do celé oblasti lidské činnosti a jinak tomu není ani v textilním průmyslu. Zde technologické postupy, strojní zařízení a textilní vlákna zaznamenaly velký pokrok ve vývoji. Mezi nejvýznamnější oblasti textilní výroby se řadí zejména vývoj a výroba funkčních oděvů a technických textilií. Moderní člověk klade na oděvy vysoké požadavky, chce, aby se v nich cítil pohodlně, zároveň ho chránil proti povětrnostním vlivům, vodě, ohni, UV záření atd. Za tímto účelem byly a stále jsou vyvíjeny nové materiály a speciální struktury, které splňují i ty nejnáročnější potřeby. Nové materiály, nové technologie a nové aplikace vyžadují nový přístup, tj. konstrukci virtuální textilie a optimalizaci jejich vlastností, predikci vlastností a kvality, ale také subjektivních vlastností, jako jsou vzhled či omak. K tomu je třeba studovat systém vlákno – svazek vláken – příze – plošná textilie. Základem je studium vnitřní struktury textilií a uspořádání vláken v přízích, uspořádání svazků vláken v plošných textiliích, atd.) a souvislost s jejich mechanickými a termickými vlastnostmi.

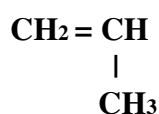
V práci jsou popsány základní zákonitosti při kroucení svazku vláken, geometrické vlastnosti a je studován vliv struktury zakrucovaného svazku na mechanické vlastnosti tj. pevnost, tažnost, akustický modul a termické vlastnosti, jako je tepelná sráživost a tepelná srážecí síla.

## 2. REŠERŠNÍ ČÁST

### 2.1 POLYPROPYLEN (PP)

Polypropylenová vlákna jsou syntetická vlákna s voskovým omakem a leskem. Mají obecně kruhový průřez, ale pro speciální použití se vyrábí s nejrůznějšími profily [1].

Molekula propylenu (monomer) se skládá ze tří uhlíků a šesti vodíků s dvojnou vazbou ve struktuře, která je při polymeraci využita [2].



Jsou to vlákna na bázi propylenu, olefinického uhlovodíku obsaženého vedle ethylenu v krakovacích plynech. Za působení speciálních katalyzátorů vzniká polymerací granulovaný polypropylen, který se dále spřádá z taveniny jako vlákna. Po dloužení se vlákno řeže a obloučkuje. Hotovým výrobkem je PP stříž [2].

Pro zlepšení zpracovatelských vlastností je na vlákno nanášena aviváž. V základním provedení mají vlákna charakteristicky bílou barvu. Pro výrobu barevných vláken se ke granulátu přidává pigmentové barvivo na polypropylenovém nosiči, určené pro barvení ve hmotě [3].

Základní parametry vláken jsou dány průměrem použitých zvláknovacích trysek a rychlostí odtahových válců (tj. jemnost vláken), stupněm dloužení (pevnost, tažnost vláken), stupněm zkadeření (tj. počet obloučků) a vzdáleností nožů na řzacím kole délka stříhu, což určí délku stříhu [3].

### 2.1.1 VLASTNOSTI POLYPROPYLENOVÝCH VLÁKEN

**Tab. 1 Vlastnosti běžně vyráběných PP vláken [4]**

Vlastnosti	Jednotky	Hodnoty
Koeficient tření	-	0,24
Měrná hmotnost	Kg.m <sup>-3</sup>	910
Pevnost	cN/dtex	1,5-6 (vysoce pevná 10)
Jemnost vláken	Dtex	1,1-20
Tažnost	%	15-60
Tažnost za mokra	%	44
Sráživost (v horké vodě)	%	0-5
Teplota žehlení	°C	Max.130
Teplota měknutí	°C	149-154
Teplota tání	°C	165-170
Teplota skelného přechodu	°C	-15 až -18
Navlhavost při RH 65%	%	0-0005
Specifické teplo	kJ. mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	83-86
Tepelná vodivost	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	0,1-0,3

PP vykazuje nízkou odolnost vůči světlu a odolává vodným roztokům chemikálií. Bobtnají v chlorovaných uhlovodících a rozpouštějí se za zvýšené teploty v xylenu a toulenu. Za vyšší teploty rychle degradují v koncentrované kyselině dusičné nebo sírové[5].

Polypropylen je nejlehčí ze všech textilních vláken (0,91 g/cm<sup>3</sup>), tato vlákna se řadí mezi LIPOFILNÍ, což znamená, že váží tuky (potní tuk), proto je lze označit za vlákna s dobrými hygienickými vlastnostmi.

Mezi výhody patří dobrá odolnost vůči oděru, nízký sklon k tvorbě žmolků a trvanlivost, nízká měrná hmotnost, snadná formovatelnost, nízká úroveň elektrického náboje a finanční dostupnost. Mají přiměřenou zotavovací schopnost a nevyvolávají alergie. PP je výborný izolační materiál, prakticky neabsorbuje molekuly vody nebo jen velmi málo.

K nevýhodám se řadí nízká tepelná odolnost, pomalé zotavení či malá tuhost a snadná zápalnost[1, 2, 3, 4].

### 2.1.2 POUŽITÍ POLYPROPYLENU

Polypropylenová vlákna se používají i ve směsi s přírodními vlákny na výrobu tkanin a pletenin. PP stříž se pro své antibakteriální a nenavlhající vlastnosti uplatňuje při výrobě funkčních a outdoorových oděvů. Používá se také pro výrobu dekoračních tkanin, pletenin pro svrchní ošacení, kobereců, stuh apod. Z technických aplikací jsou polypropylenová vlákna významná pro výrobu geotextilií, kde mají separační, ochrannou, filtrační či zpevňovací funkci a nemají negativní vliv na kvalitu pitné vody. Dále se PP vlákna využívají při výrobě filtračních tkanin, rybářských sítí, lan, pneumatických kordů, pásových dopravníků, v automobilovém či stavebním průmyslu atd.[1, 2, 4].

## 2.2 VLASTNOSTI VLÁKEN

Základní vlastnosti vláken se dělí na geometrické, je to například délka, jemnost a tvar příčného řezu, dále rozlišujeme mechanické vlastnosti, mezi které se řadí pevnost, tažnost, modul, tuhost či zotavení. Termické a termomechanické vlastnosti jsou bod tání, zesklnění, přechodové teploty, ztrátový úhel či ztrátový modul. V neposlední řadě rozlišujeme elektrické vlastnosti (statický náboj, dielektrické chování, izolační schopnosti) dále povrchové (adheze, transportní chování) či oděr a stárnutí a chemická odolnost[6].

### 2.2.1 JEMNOST A PRŮMĚR VLÁKNA

Délková jemnost vlákna vyjadřuje vztah mezi hmotností příze  $m$  [g] a délkou  $l$  [km]. Pro vyjádření délkové jemnosti používáme soustavy [tex]. Pro tento výpočet platí vztah

$$t = \frac{m}{l} = s\rho = \frac{\pi d^2}{4} \rho \quad (1)$$

kde  $s$  [mm<sup>2</sup>] je plocha příčného řezu vlákna,  $\rho$  [kg.m<sup>-3</sup>] je měrná hmotnost vlákna a  $d$  [mm] značí průměr vlákna.

Obyčejně není průřez vlákna kruhový, pro tento případ je zaveden ekvivalentní průměr

$d_e$ [mm<sup>2</sup>], který je vyjádřen pomocí jemnosti monofilového vlákna  $t$  [tex] a jeho hustoty  $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>]. Ekvivalentní průměr

$$d_e = \sqrt{\frac{4t}{\pi\rho}} \quad (2)$$

vyjadřuje průměr kruhového vlákna, který má stejný průřez vlákna  $s$  jako vlákno nekruhové [8].

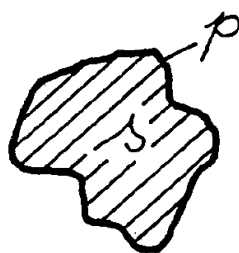
### 2.2.2 TVAR PŘÍČNÉHO ŘEZU VLÁKNA

Příčný řez vlákna je řez, který je vedený kolmo ke směru průchodu textiliie strojem a rovnoběžný řez je vedený rovnoběžně s tímto směrem. Tvar příčného řezu polypropylenových vláken je dán tvarem použitých zvlákňovacích trysek. Z obr. 1 je na první pohled patrné, že příčný řez nemá vždy tvar ideálního kruhu. Proto K. Malinowská definovala tvarový faktor průřezu  $q$  ve vztahu k ideálnímu kruhovému tvaru vlákna

$$q = \frac{p}{\pi d} - 1 \quad (3)$$

Kde  $p$  je obvod vlákna, pro který lze použít vztah

$$p = \pi d (1 + q) \quad (4)$$



Obr. 1 tvar příčného řezu, plocha  $s$  je uzavřena obvodem  $p$  [8]

Pro kruhový průřez vlákna platí vztah

$$p / (\pi d) = 1 \quad (5)$$

Není-li tvar příčného řezu kruhový, platí předpoklad, že tvarový faktor je větší než 1[8].

### 2.2.2 PEVNOST , TAŽNOST, TAHOVÁ KŘIVKA VLÁKNA

Pevnost se definuje buď jako relativní síla, což je síla do přetrhu vztažená k jemnosti vlákna a značíme ji **Fr** [ N/tex ], nebo jako napětí do přetrhu **σp** [ GPa] vztažené k ploše vlákna [6].

Pevnost příze zachytává okamžik porušení, ke kterému dochází v nejslabším a nejméně pevném místě zatěžovaného vlákna. S délkou testovaného vzorku roste pravděpodobnost výskytu slabých míst tak, že dochází s rostoucí upínací délkou ke snížení pevnosti. Zkoušku pevnosti provádíme na trhacích přístrojích a zajišťujeme mezní odolnost délkového vlákenného materiálu při účinku tahové síly. Platí, že

$$R = \frac{F}{t} = \frac{F}{s\rho} \quad [\text{N/tex}^{-1}] \quad (6)$$

kde **R** je poměrná pevnost vlákna v tahu [N/tex<sup>-1</sup>], **F** je absolutní pevnost vlákna v tahu [N] a **t** se rovná jemnosti vlákna v [tex].

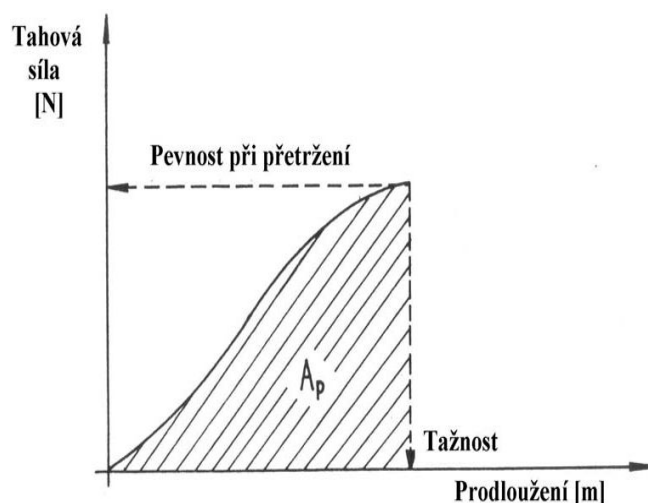
Souběžně s pevností je sledována tažnost vzorku. Tažnost je definována jako deformace do přetrhu, značená **εp** [%], je to poměrné prodloužení při dosažení maximální tahové síly, vyjádřené jako % upínací délky dle vztahu [6, 12]

$$\varepsilon_p = \frac{L_p - L_o}{L_o} 100 \quad (7)$$

Kde **εp** je poměrné prodloužení při přetržení (tažnost) [%], **Lp** značí délku vzorku v okamžiku

přetržení [mm], **Lo** [mm] je délka vzorku mezi upínacími čelistmi v okamžiku upnutí tzv. upínací délka [6,7,12].

Zkoušky tažnosti a pevnosti probíhají současně, což nám zároveň umožňuje zjištění deformační práce  $A_p$  [J]. Její velikost je úměrná ploše pracovního diagramu mezi osou prodloužení a tahovou křivkou (obr. 2).

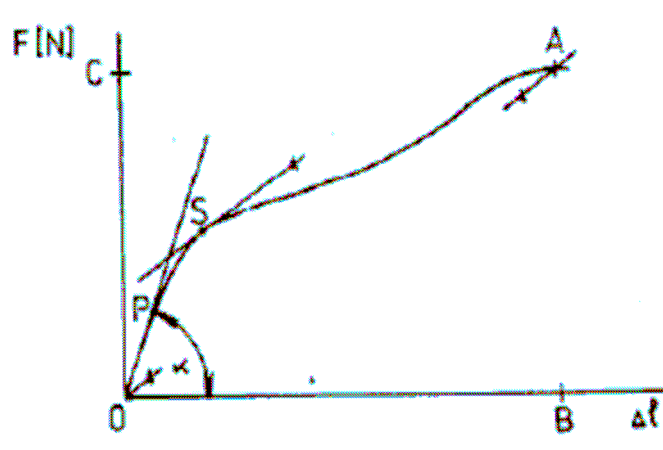


Obr. 2 Pracovní křivka při tahovém namáhání délkové textilie

Pevnost a tažnost jsou základními charakteristikami všech typů vláken, tyto hodnoty ale nepopisují dostatečně změny, ke kterým v průběhu tahové zkoušky ve vláknech dochází. Obecná pracovní křivka (obr. 2) znázorňuje namáhání vláken až do přetrhu. Z tohoto důvodu je důležité sledovat průběh a výsledný tvar tahové křivky [14].

Počáteční modul vyjadřuje strmost tahové křivky až do bodu meze pružnosti (obr. 3). Modul pružnosti je závislý na druhu materiálu, teplotě, době a rychlosti zatížení. Čím je křivka strmější, tím má vlákno větší odpor proti deformaci. Čím je menší modul pružnosti, tím je vyšší tažnost [15].





Obr. 3 Deformační křivka

Z této křivky je patrný počátek v 0. Úsek 0 – P značí oblast pružných, neboli elastických deformací, které se po uvolnění napětí vrátí. Bod P je mez pružnosti a nad tímto bodem se začínají projevovat plastické (nevratné) deformace. S je bod počátku kluzu, A – maximální síla a B maximální protažení při přetrhu [15].

Tab. 2 Porovnání pevností a tažností jednotlivých vláken [6]

Vlákno	Pevnost [ cN . dtex <sup>-1</sup> ]	Tažnost[ % ]
Vlna	1-2	20-40
Bavlna	2.7-4.3	3-10
Viskoza	2-3	15-30
Acetát	1.3	20-45
PA 6	3.7-5.2	25-40
PA 6.6	3.7-5.4	25-40
PES	4.1-4.5	19-23
PP	<b>2.7-6.3</b>	<b>25-75</b>
PAN	2.0-2.9	20-28
Kevlar	19	4

### 2.2.3 MEZ PRUŽNOSTI A MEZ KLUZU VLÁKEN

Mez pružnosti – při tomto napětí ještě nevznikají trvalé deformace. Je zde předpoklad, že deformace vznikající až do meze pružnosti jsou elastické, což znamená okamžité deformace, časově nezávislé a vratné. Pro pružnou deformaci platí Hookeův zákon

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (8)$$

kde  $E$  je konstanta úměrnosti, neboli Youngův modul mezi napětím  $\sigma$  a deformací  $\varepsilon$ .

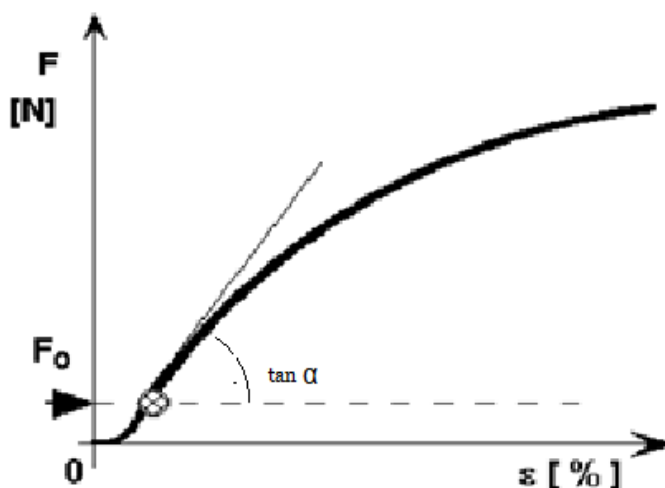
Při přechodu přes teplotu zesklnění vzniká zlom závislosti prakticky všech vlastností na teplotě např. index lomu, objemu, permitivity, tepelné vodivosti či ohebnosti. Pro mechanické chování platí ve skelném stavu také Hookeův zákon a to při malých deformacích.

V každé látce vznikají malé plastické deformace již při nejmenších napětích, proto neexistuje jasné rozhraní mezi elasticou a plastickou deformací, a proto není možné experimentálně stanovit mez pružnosti [16, 17].

Mez kluzu značí nejmenší hodnotu aplikovaného napětí, od kterého začíná výrazná plastická tj. nevratná deformace [14].

#### **2.2.4 PŘEDPĚTÍ**

V počátku tahové křivky nevzrůstá síla, nebo-li napětí lineárně s deformací, jelikož se zde projevuje zakřivení, které je způsobené vyrovnáváním vnitřních sil uvnitř útvaru. Pro přesné stanovení deformace, která je závislá na změně délky a počátečního tangentového modulu se vkládá před měřením pevnosti na vlákno předběžná síla  $F_0$ , kterou nazýváme předpětí (obr.4). Velikost předpětí je stanovena normou. Nejprve je materiál zatížen požadovaným předpětím a následně je pomocí přístroje měřena pevnost a tažnost vzorku [14].



Obr. 4 Předpětí [14]

### 2.2.5 ŠÍŘENÍ A RYCHLOST ZVUKU, AKUSTICKÝ DYNAMICKÝ MODUL, ORIENTACE VNITŘNÍHO USPOŘÁDÁNÍ VE VLÁKNECH

V pružném prostředí, pevných látkách a tekutinách, existují částice, které jsou mezi sebou vázány nebo na sebe působí při vzájemných srážkách. To způsobí, že kmitání částic se v kontinuu přenáší a tím dochází k šíření mechanického vlnění, které je způsobeno vznikem elastických vln. Rychlost šíření zvuku lze vyjádřit dle

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (9)$$

kde  $c$  značí rychlost šíření podélného vlnění,  $E$  je modul pružnosti a  $\rho$  je hustota.

Rychlost zvuku ve vzduchu  $C_a$  [m/s] závisí především na vlhkosti, teplotě [°C] a nečistotách ve vzduchu. Běžná hodnota  $C_a$  je 340 [m/s] [13].

Rychlost zvuku vlákna či polymeru může být mírou anizotropie. Když se zvyšuje orientace, stoupá i rychlost zvuku. Rychlost zvuku vypočítáme z času, který je potřebný na průchod zvuku vláknem definované délky. Doporučená frekvence je 10 kHz a upínací délka 10 cm. Tyto metody

je možné použít v kombinaci s dalšími metodami k určení orientace krystalické a amorfní fáze ve vlákne [11].

Měřením rychlosti šíření zvuku v orientovaném ( $C$ ) a v neorientovaném ( $C_a$ ) polymeru lze získat průměrný orientační faktor  $\bar{f}$ . Dle zjednodušeného odvození platí, že

$$\overline{\cos^2 \theta} = 1 - \frac{2 C_a^2}{3 C^2} \quad (10)$$

kde  $\overline{\cos^2 \theta}$  je střední hodnota druhé mocniny kosinů orientovaných úhlů anizotropních jednotek [13].

Stupeň orientace odvodíme dle Hermansova orientačního faktoru

$$\bar{f} = 1,5 \overline{\cos^2 \theta} + 0,5 \quad (11)$$

Světelná mikroskopie umožňuje sledovat mnoho strukturních charakteristik vlákna. Mikroskopie v nepolarizovaném světle je vhodná především k hodnocení povrchových vlastností vláken, na rozdíl od polarizovaného světla, které je možno využít i ke sledování vnitřní struktury vláken. Intenzita prošlého světla je závislá na orientaci řetězců v daném místě, následně se vytváří v závislosti na poloze polarizátoru a analyzátoru tmavá a světlá místa, která charakterizují nadmolekulární struktury orientované kolmo nebo rovnoběžně s rovinou polarizovaného světla. Faktor orientace souvisí s průměrnou orientací molekul ve směru osy vlákna [11].

Průměrnou orientaci vláken můžeme stanovit ze vztahu

$$fo = 1 - \frac{Cn^2}{C^2} \quad (12)$$

kde  $fo$  značí celkovou průměrnou orientaci,  $Cn$  je rychlost zvuku zkoumaného vlákna a  $C$  odpovídá rychlosti zvuku úplně orientovaného vlákna.

Optický dvojlom je mírou anizotropie neboli mírou celkové orientace polymerního systému a je definován rozdílným indexem lomu světla naměřeného v rovnoběžném  $n_{||}$  a kolmém  $n_{\perp}$  směru na osu vlákna.

$$\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} \quad (13)$$

Z dvojlomu a dalších metod lze stanovit orientaci krystalických a amorfních oblastí podle vztahu

$$f_o = \beta \cdot f_k + (1 - \beta) \cdot f_a \quad (14)$$

kde  $f_o$  je celková orientace vláken,  $f_k$  značí faktory orientace krystalické,  $f_a$  je orientace nekystalických oblastí a  $\beta$  resp.  $(\beta-1)$  jsou podíl krystalické resp. amorfní fáze [11].

## 2.3 VLASTNOSTI ROVNOBĚŽNÝCH A ZAKROUCENÝCH SVAZKŮ VLÁKEN

### 2.3.1 JEMNOST, SUBSTANČNÍ PRŮMĚR A POČET VLÁKEN VE SVAZKU

Pro vyjádření jemnosti svazku rovnoběžných vláken platí vztah

$$T = \frac{M}{L} = \frac{\rho \cdot V_v}{L} = \rho \cdot S = \rho \cdot \frac{\pi D_s^2}{4} \quad (15)$$

kde  $T$  je jemnost svazku vláken v [tex],  $M$  značí hmotnost svazku vláken v [g],  $L$  je délka vzorku v [km],  $\rho$  udává měrnou hmotnost vláken v [kg.m<sup>-3</sup>],  $V_v$  je objem svazku vláken v [m<sup>-3</sup>] a  $S$  je celková plocha příčného řezu svazkem vláken v [mm<sup>2</sup>].

Z tohoto vztahu lze odvodit výpočet substančního průměru svazku vláken  $D_s$ , nejmenšího možného stlačeného průměru bez vzduchových mezer

$$D_s = \sqrt{\frac{4T}{\pi\rho}} \quad (16)$$

Substanční průměr vláknenného svazku je vždy menší než skutečný průměr  $D$ .

Počet rovnoběžných vláken  $n$  ve svazku je poměrem jemností svazku  $T_{sv}$  ku jemnosti jednotlivých vláken  $t_v$  [8].

$$n = \frac{T_{sv}}{t_v} \quad (17)$$

### 2.3.2 ZAPLNĚNÍ, IDEALIZOVANÉ TVARY PŘÍČNÝCH ŘEZŮ

Zaplnění  $\mu$  je definováno jako podíl objemu vláken  $V_v$  v  $[m^3]$  ku celkovému objemu vláknenného útvaru  $V_c$  v tomto intervalu  $<0;1>$  [8].

$$\mu = \frac{V_v}{V_c} \quad (18)$$

Zaplnění lze vyjádřit také jako poměr ploch vláken k celkové ploše průřezu vláken.

$$\mu = \frac{S}{S_c} = \frac{4T}{\pi D^2 \rho} \quad (19)$$

kde  $S$  značí souhrnnou plochu vláken ve svazku v  $[mm^2]$  a  $S_c$  je celková plocha v  $[mm^2]$ .

Z tohoto vztahu je odvozen průměr svazku vláken  $D[mm]$

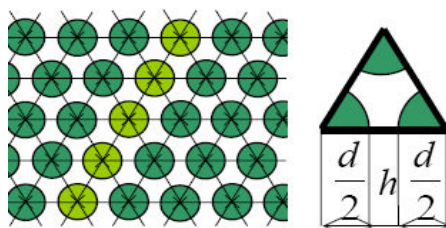
$$D = \sqrt{\frac{4T}{\pi \mu \rho}} \quad (20)$$

Nejvyšších hodnot dosahuje zaplnění v jádře příze. Zaplnění se po průřezu příze mění a je ovlivněno vlákny, typem, tvarem příčného řezu, jemností, zákrutem a technologií výroby příze. Zaplnění 1 představuje strukturu bez vzduchových mezer [8].

Snaha pochopit zákonitosti reálných řezů vedla již v minulosti ke vzniku idealizovaných modelů. Řezná plocha každého vlákna se v nich uvažuje jako kruh s průměrem  $d$  a předpokládá se pravidelné těsné uspořádání těchto kruhů [20].

E.R.Schwarz analyzoval dvě základní formy idealizovaných řezů, formu šestiúhelníkového uspořádání, zvanou jako plástová a otevřenou formu uspořádání v kruzích, označovaná jako struktura válcová [20].

Zaplnění v ideálním svazku válcových vláken paralelních, pravidelně rozmístěných do hexagonální struktury. Strukturní jednotka v průřezu je rovnostranný trojúhelník.



Obr.5 Zaplnění v ideálním svazku vláken [8]

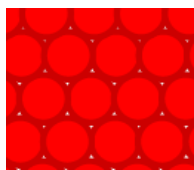
Pro zaplnění v ideálním svazku vláken odvodil Neckář [8] vztah

$$\mu = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \frac{1}{(1+h/d)^2} \quad (21)$$

kde  $d$  značí průměr vlákna a  $h$  je vzdálenost sousedních povrchů [8].

Za podmínky  $h=0$  vzniká tzv. limitní struktura, neboli nejtěsnější uspořádání vláken ve svazku dle vztahu

$$\mu = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} = 0,903. \quad (22)$$



Obr. 6 Limitní struktura vláken [8]

Pro daný počet vláken plástové struktury odvodil Neckář hodnoty uvedené v tab.3[20].

**Tab. 3 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY PLÁSTOVÉ STRUKTURY [20]**

<i>i</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	<i>R/d</i>	<i>μ</i>
1	1	1	0,525	0,907
2	6	7	1,434	0,851
<b>3</b>	<b>12</b>	<b>19</b>	<b>2,344</b>	<b>0,865</b>
4	18	37	3,253	0,880
5	24	61	4,163	0,884

Kde *i* značí pořadové číslo vrstvy, *m* je počet vláken ve vrstvě, *n* je počet vláken ve svazku, *R/d* udává poloměr kruhu všech počítaných vrstev a *μ* značí hodnotu již zmíněného zaplnění.

### 2.3.3 ZÁKRUT, ZÁKRUTOVÝ KOEFICIENT SVAZKU VLÁKEN

Zákrutem rozumíme zpevnění vláken ve vlákenném svazku zakroucením ve směru šroubovice kolem osy příze vyjádřené počtem celých otáček na délku 1 metru. Dochází ke zvýšení počtu kontaktů ve vlákenném svazku, dochází ke zvýšení zaplnění, jednotlivá vlákna se vzájemně přitlačí k sobě a tím se také zvýší tření. Zákrut dělíme podle směru zakroucení na pravý (Z) a levý zákrut (S) či na trvalý (předpřádání, dopřádání) nebo nepravý, který je udělený dočasně zaoblováním [7].



Obr. 7 Levý a pravý směr zákrutu

Vyjádření strojního zákrutu vlákenného svazku

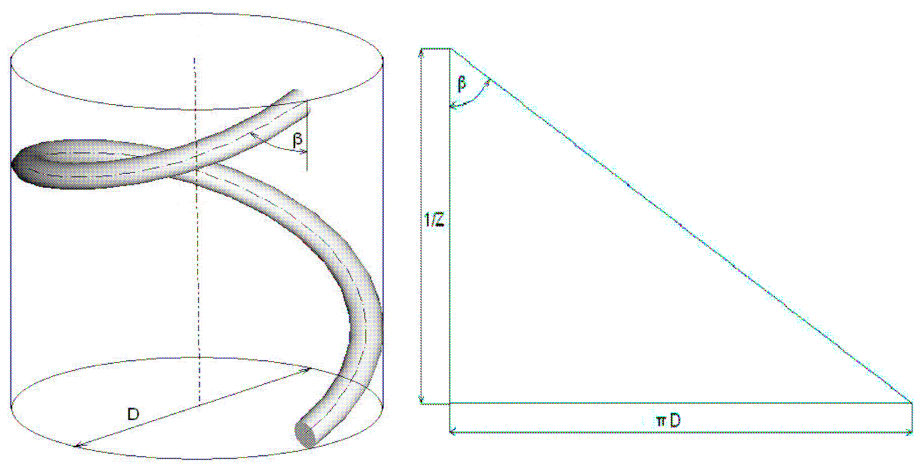
$$Z = \frac{n}{v} = \frac{n}{L} \quad [\text{m}^{-1}] \quad (23)$$

kde *Z* je počet zákrutů v  $[\text{m}^{-1}]$ , *n* jsou otáčky zákrutového ústrojí *v*  $[\text{min}^{-1}]$ , *v* udává odváděcí rychlost v  $[\text{m min}^{-1}]$  a *L* [m] značí délku vlákenného svazku.



Obecná křivka vlákna má obvykle komplikovaný tvar, proto lze složitou geometrii reálných vláken zjednodušit a výsledkem je ideální šroubovicový model příze (obr. 8). Tento model splňuje následující předpoklady:

- Příze tvoří válec o průměru  $D$
- Osy všech vláken mají tvar šroubovice a stejný směr otáčení
- Šroubovice všech vláken mají společnou osu, tedy osu příze
- Vlákná jsou válcová s kruhovým průřezem o průměru  $d$
- Výška ovinu každé šroubovice je stejná
- Výška stoupání šroubovice je  $1/Z$
- Ve všech místech příze je stejné zaplnění  $\mu$



Obr . 8 Šroubovicový model

Intenzitu zákrutu povrchových vláknem  $\kappa$  lze vyjádřit

$$\operatorname{tg} \beta = 2DZ = \kappa \quad (24)$$

kde  $D$  značí průměr příze a  $Z$  je zákrut příze udávaný v  $[\text{m}^{-1}]$  [3, 7, 8].

Počet paralelně uložených vláken ve svazku vláken udává poměrnou jemnost vláken  $\tau$ . Její hodnota je dána poměrem jemnosti příze  $T$  ku jemnosti vlákna  $t$ .

$$\tau = \frac{T}{t} \quad (25)$$

kde  $\tau$  je poměrná jemnost vláken [-],  $T$  [tex] je jemnost vlákenného svazku a  $t$  je jemnost vlákna v [tex].

Jak vyplývá ze šroubovicového modelu, vlákna v přízi nejsou uložena přesně rovnoběžně, ale jsou zešikmena. Míru zešikmení vláken v přízi udává koeficient migrace  $k_s$ . Lze tedy říci, že koeficient migrace udává, do jaké míry odpovídá reálná příze šroubovicovému modelu.

$$k_s = \frac{S_r}{S_s} \quad k_s \leq 1 \quad (26)$$

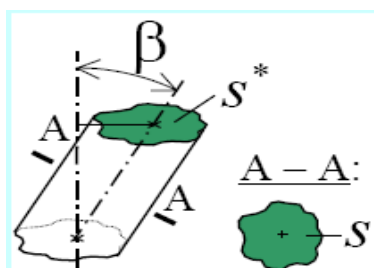
kde  $k_s$  značí koeficient [-],  $S_r$  je reálná součtová plocha v průřezu vláken [mm<sup>2</sup>] a  $S_s$  je substanční průřez vláken [mm<sup>2</sup>].

Také reálný počet vláken  $n_r$  je odlišný od hodnoty poměrné jemnosti vypočtené za předpokladu paralelního uložení vláken (viz. rce.(24) )

$$n_r = \tau k_n \quad k_n \leq 1 \quad (27)$$

kde  $n_r$  značí reálný počet vláken [-],  $k_n$  je koeficient [-] a  $\tau$  je poměrná jemnost vláken [-]. Za podmínky paralelního uložení vláken platí  $k_n = 1$ , pro sklon vláken platí  $k_n < 1$ .

Kolmý řez rovnoběžným vlákenným svazkem protne jednotlivá vlákna v řezné ploše  $s^*$  [mm<sup>2</sup>].



Obr.9 Plocha celého vlákna, které leží na poloměru diferenciální vrstvy

$$s^* = s / \cos \beta = s \cdot (\sqrt{1 + (\pi D Z)^2}) \quad (28)$$

Vláknenné svazky se definují pomocí koeficientu zákrutu, který je závislý na zákrutu a jemnosti svazku vláken, nebo na souhrnné ploše vláken, z čehož vznikne plošný zákrutový koeficient. Běžně se používá zákrutový koeficient dle Koechlina či Phrixe [7].

Koechlinův zákrutový koeficient (pro hrubší materiály – přást, len skaná příze)

$$\alpha = Z T^{1/2} \quad (29)$$

$$\alpha = \frac{Z \cdot T^{2/3}}{31,623} \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{Ktex}^{1/2}] \quad (30)$$

Kde  $\alpha$  je Koechlinův zákrutový koeficient v  $[\text{m}^{-1} \cdot \text{Ktex}^{1/2}]$ ,  $Z$  udává počet zákrutů v  $[\text{m}^{-1}]$

a  $T$  značí jemnost zakrucovaného svazku vláken v [tex].

Další veličina související se zákrutem je plošný Koechlinův zákrutový koeficient, jedná se bezrozměrnou veličinu vyjádřenou vztahem

$$\alpha_s = Z \sqrt{S} \quad (31)$$

Phrixův zákrutový koeficient [-], který se používá především pro příze

$$\alpha = Z \cdot T^{2/3} \quad (32)$$

$$\alpha = \frac{Z \cdot T^{2/3}}{10^2} \quad [\text{m}^{-1} \cdot \text{Ktex}^{2/3}] \quad (33)$$

kde  $a$  je Phrixův zákrutový koeficient udávaný v  $[m^{-1} \cdot K \cdot tex^{2/3}]$ ,  $Z$  udává zákrut příze v  $[m^{-1}]$  a  $T$  je jemnost příze v  $[tex]$  [3, 7].

Phrixův plošný zákrutový koeficient lze vyjádřit jako:

$$a_s = ZS^{2/3} \quad (34)$$

### 2.3.4 SESKÁNÍ

Při zakrucování dochází ke zkrácení původní délky a to je dáno vztahem

$$\Delta l = l_o - l \quad [mm] \quad (35)$$

kde  $\Delta l$  značí změnu délky v  $[mm]$ ,  $l_o$  je upínací délka v  $[mm]$  a  $l$  je délka po přikroucení příze v  $[mm]$ .

Seskání přízí je definováno dle vztahu

$$\delta_s = \frac{\Delta l}{l_o} \cdot 10^2 \quad [\%] \quad (36)$$

kde  $\delta_s$  je seskání příze v  $[\%]$ ,  $\Delta l$  značí změnu délky v  $[mm]$ .

Předpokládejme, že  $L_o = L$ , kde  $L_o$  je souhrnná délka před zakroucením a  $L$  značí souhrnnou délku vláken po zakroucení a zde platí vztah

$$L = \frac{Sl}{s} = L_o = nl_o \quad (37)$$

Z něhož lze odvodit

$$\frac{l}{l_o} = \frac{ns}{S} = \frac{s}{s^*} = kn \quad (38)$$

kde  $K_n$  je součinitel počtu vláken vyjadřující orientaci vláken ve svazku.

Dle Neckáře [8] je odvozen vzorec pro počet vláken

$$n = \frac{\mu}{2\pi Z^2 s} \left[ \sqrt{1 + (\pi D Z)^2} - 1 \right]. \quad (39)$$

Užitím předpokladu a předchozího  $k_n$  lze odvodit

$$\delta = 1 - \frac{l}{l_0} = 1 - kn = \frac{\sqrt{(1 + (\pi DZ)^2)} - 1}{\sqrt{(1 + (\pi DZ)^2)} + 1} \quad (40)$$

$$\delta = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{\sqrt{1 - 4\pi\alpha_{se}^2}}{\mu} \quad (41)$$

Kde  $\alpha_{so}^2$  je Koechlinův plošný zákrutový koeficient vztažený k původní délce před zakroucením.

### 2.3.5 PEVNOST A TAŽNOST VLÁKENÝCH SVAZKŮ

Pevnost materiálu je dána pevností samotného vlákenného materiálu, variabilitou jeho pevnosti a tažnosti, ale také jako konstrukcí, např. potem vláken v řezu, strukturálními faktory, mezi které patří zejména zákrut, stupeň napřímení vláken či migrace vláken. Kvantitativně se tato vlastnost vyjadřuje jako absolutní pevnost v tahu a je vyjádřena v jednotkách síly [N]. Pro praxi vhodnějším a častějším je použití tzv. poměrné pevnosti [N/tex] [3, 7, 13].

Pro zjednodušení je uvažován svazek geometricky stejných paralelních vláken. Pokud by tato vlákna byla totožná z ohledu geometrických a mechanických vlastností i chemické struktury a praskla by všechna najednou, bylo by napětí svazku stejné jako napětí libovolného vlákna. V praxi zajistit všechny tyto předpoklady je nemožné. Při přetrhu dochází k postupnému praskání vláken od těch nejslabších. Přenášené napětí se následně rovnoměrně rozdělí mezi zbylá vlákna [8].

Nezakroucený svazek rovnoběžných vláken vláken stejné jemnosti musíme pro vyvození stejného poměrného prodloužení  $\varepsilon_a$  napnout silou  $P^*$

$$P^* = \sigma_a S = \pi \mu E \varepsilon_a \left( \frac{D}{2} \right)^2 \quad (42)$$

Kde  $\sigma$  značí tahové napětí,  $\varepsilon$  je poměrné prodloužení a  $E$  je Youngův modul pružnosti.

Pro využití tahové síly v zakrouceném svazku platí

$$\varphi = \frac{P}{P_*}. \quad (43)$$

Využití pevnosti vláken ve svazku závisí na variačním koeficientu pevnosti vláken[8].

### 2.3.6 AKUSTICKÝ DYNAMICKÝ MODUL A ORIENTACE VE VLÁKNECH VLÁKENNÉHO SVAZKU

Akustický dynamický modul příze je oproti zvukovému modulu vláken snížen o násobný faktor od 0,05 do 0,6. Toto snížení nejvíce souvisí s úhlem sklonu vláken k ose příze, neboli zákrutem [13].

Akustický dynamický modul příze  $Ep$  je funkcí modulu vláken  $Ev$ .

$$Ep = Ev \cos^2 \beta = \frac{Ev}{1 + \pi^2 D^2 Z^2} \quad (44)$$

Z předchozích vztahů odvodíme (20, 29)

$$Ep = Ev \frac{\mu\rho}{\pi\rho + 4\pi I Z^2} = Ev \frac{\mu\rho}{\mu\rho + 4\pi\alpha^2} \quad (45)$$

Podíl  $\frac{E_{zakr.sv}}{E_{rovnoběžo.sv}}$  vyjadřuje orientaci vláken ve svazku. Dle [21] bylo ukázáno, že podíl modulů

staplové příze a svazku rovnoběžných vláken odpovídá faktoru orientace vláken v přízi. Faktor orientace je zde též funkcí  $\cos^2 \beta$ , kde  $\beta$  je úhel sklonu šroubovice povrchových vláken.

## 2.4 TERMICKÉ VLASTNOSTI VLÁKEN

### 2.4.1 TERMICKÁ ANALÝZA

Termická analýza je širší pojem pro takové experimentální analytické metody, při kterých se měří fyzikální a chemické vlastnosti zkoumané v závislosti na čase nebo při řízeném teplotním programu. Jsou to metody popisující změny fyzikálně chemických vlastností sledovaného systému při jeho ohřevu. Většina těchto metod sleduje především takové vlastnosti systému, jako je hmotnost, energie, rozměr, vodivost atd. Vzorek může být tedy při teplotním měření vystaven i vlivům jako je např. reaktivní atmosféra nebo statické či dynamické mechanické zátěži. Oblast využití termické analýzy pro polymery a vlákna je velmi široká. I v této oblasti jsou stále vyvíjeny nové metody, které nám umožňují sledovat změny vlastností materiálu s teplotou. Obecně jsou zde nejdůležitější tyto tři veličiny [18].

- a) čas
- b) teplota
- c) odezva materiálu na podmínky testování

Při izotermickém ohřevu se mohou sledovat změny vlastností v závislosti na čase. V praxi je však často kombinován izotermický a neizotermický ohřev zkoumaného materiálu. Pro neizotermní ohřev stanovíme rychlost ohřevu a čas je pak dán rychlostí ohřevu a teplotním intervalem, ve kterém měření provádíme.

$$K = (K/min) * \text{čas (min)} \quad (46)$$

Kde **K** je teplotní interval, **K/min** značí rychlost ohřevu, který vynásobíme časem [18].

Nejčastěji se při termických metodách používá proměnné teploty, ale proces může probíhat i za izotermických podmínek. Většinou se jedná o konstantní rychlost ohřevu, ale současná úroveň regulační a výpočetní techniky nám umožňuje i jiné možnosti ohřevu, jako například periodické zvyšování a následné snižování teplota ve zvoleném teplotním intervalu, přičemž vzrůst teploty může být konstantní rychlostí a pokles teploty samovolný nebo může být konstantní rychlost ohřevu i chlazení [18].

#### 2.4.2 ZÁKLADNÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TERMOANALYTICKÉ MĚŘENÍ

Tyto základní faktory můžeme rozdělit do 3 skupin:

- a) faktory instrumentálního charakteru
- b) faktory metodické

c) vlastnosti zpracovávaných látek

Mezi faktory instrumentálního charakteru patří tepelné zdroje a teplotní regulační systémy, mezi které se řadí způsob ohřevu a tvar ohřívací komory. Dalším důležitým faktorem je systém měření teploty, zejména jeho druh a rozměry či umístění termočlánku vzhledem ke vzorku. Nezbytný je systém záznamu termoanalytické křivky, který zachycuje rychlost a citlivost registračního systému a nesmíme opomenout ani snímací systém a jeho konstrukci [18].

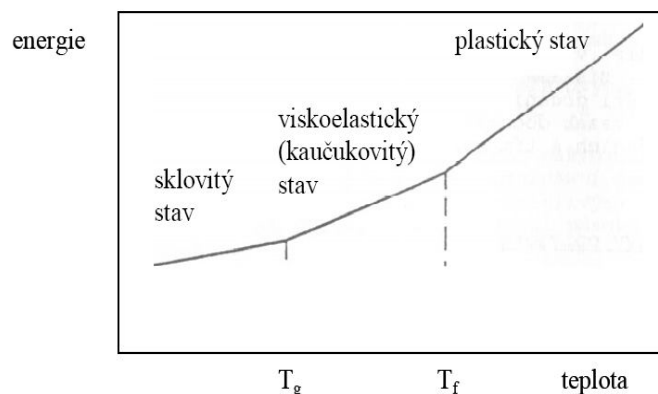
Mezi faktory metodické řadíme zejména způsob ohřevu (jeho rychlost, linearitu, regulaci, spolehlivost řízení periodicity rychlosti), dále celkové řešení a uspořádání přístroje či způsob umístění a úpravy vzorku, zde bereme ohled hlavně na velikost vzorku, jeho předběžnou úpravu, homogenitu a kompaktnost či měření v otevřené, uzavřené nebo tlakové měřící cele. Dalším metodickým faktorem je označován vliv atmosféry a způsob komunikace atmosféry a vzorku, což zahrnuje především vliv tlaku, složení atmosféry případně odvod degradačních produktů [18].

Mezi vlastnosti zpracovávaných látek patří především fyzikální a chemické vlastnosti aktivního vzorku, kde se mezi nejdůležitější vlastnosti řadí tepelná a teplotní vodivost, velikost, hustota, tepelná kapacita, vliv vlhkosti a rozpouštědel, bobtnatost, vliv příměsí, aditiv či povrchových aviváží apod. [18].

### **2.4.3 CHOVÁNÍ POLYMERŮ VE VZTAHU K TEPLITĚ**

K převedení polymeru do stavu taveniny je nutné dodat tolik tepelné energie, kolik je jí potřeba k přerušení významné části mezimolekulárních vazeb. Tyto vazby se znovu obnoví po odebrání této energie [17].





Obr.10 Závislost obsahu energie polymerů na teplotě

U nízkomolekulových látek mají  $T_t$  (teplota tání) a  $T_v$  (teplota varu) přesně definované hodnoty, zatímco teplota skelného přechodu  $T_g$  a teplota tenčení  $T_f$  jsou oblastmi určité šíře. Tyto přechody nízkomolekulových látek jsou z jednoho do druhého stavu provázány skokovou změnou energie a nazýváme je přechody 1. řádu. Přírůstek energie s teplotou je u polymerů v oblasti  $T_g$  a  $T_f$  plynulý a příslušné přechody značíme jako přechody 2. řádu (skokem se mění derivace uvedené závislosti na obr. 10). Sklovitý stav polymerů můžeme charakterizovat jako fixovanou polohu celých makromolekul vůči sobě a vysokou koncentrací mezimolekulových vazeb, což znamená, že ve hmotě se uskutečňuje pouze vibrační pohyb jednotlivých atomů nebo funkčních skupin. Pro mechanické chování platí ve skelném stavu při malých deformacích již zmíněný Hookeův zákon. Polymer je v bodu teploty  $T_g$  tvrdý a křehký. Viskoelastický stav (mezi  $T_g$  a  $T_f$ ) je typický pro polymery. Při tomto energetickém obsahu je realizována jen část možných mezimolekulových vazeb, které zajišťují vzájemné polohy makromolekul. Důsledkem viskoelastického (kaučukovitého) stavu je možnost makromolekul vzájemně se přemísťovat postupným pohybem jednotlivých úseků při působení vnější síly. Toto přemísťování může být vratné, jestliže síla působila jen krátce a došlo k přesunu malého množství segmentů, nebo naopak trvalé. Chování v tomto stavu, které je časově závislé, lze vyjádřit pomocí Maxwellova modelu, který vyplývá z výše uvedeného Hookeova zákona a Newtonova zákona toku [17].

Závislost přetvoření na přenášeném napětí pro Maxwellův model uvádí ve tvaru

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\tau E} \sigma \quad (47)$$

kde  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  značí rychlost přetvoření,  $E$  je Youngův modul pružnosti,  $\sigma$  je hodnota napětí,  $\tau$  materiálová konstanta zvaná relaxační doba (vliv doby působení napětí na míru trvalého přetvoření).

V plastickém stavu, který je nad bodem  $T_f$ , je koncentrace mezimolekulových vazeb velice nízká, proto může docházet k nevratnému přemisťování celých makromolekul. Tento děj nazýváme tokem, jehož rychlost se řídí Newtonovým zákonem [17].

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (48)$$

Kde  $\eta = \tau$  a  $E$  je charakteristika odporu materiálu vůči toku zvaná viskozita.

#### 2.4.4 MAXIMÁLNÍ, EFEKTIVNÍ A ZBYTKOVÁ TEPELNÁ SRÁŽIVOST

Maximální tepelná sráživost je největší hodnota relativního zkrácení, neboli sražení délky zkoušeného textilního vzorku, odečtená ze začátku zkoušky při konstantním napětí, které je zajištěno pomocí předpětíových závaží.

Efektivní tepelná sráživost udává relativní zkrácení délky délkového textilního útvaru. Toto sražení vzniká vlivem působení definované teploty a doby jejího působení za konstantního napětí na délkový vlákenný útvar. Doporučená doba měření je jedna minuta.

Zbytková, neboli reziduální tepelná sráživost udává relativní zkrácení délky délkového vlákenného útvaru, které vznikne po ukončení působení definované teploty na textilní vzorek za konstantního napětí. Doba měření zbytkové tepelné sráživosti je dána 0,5 minuty [19].

#### 2.4.5 KINETICKÁ KŘIVKA SRÁŽENÍ, MAXIMÁLNÍ SRÁŽECÍ RYCHLOST

Kinetická křivka srážení je definována jako křivka efektivní tepelné sráživosti, která je udávána v závislosti na čase při dané teplotě.

Definice maximální srážecí rychlosti je dána jako maximální hodnota derivace kinetické křivky srážení. Citlivost rychlosti srážení na teplotě je značena jako směrnice regresní přímky (metoda nejmenších čtverců) závislosti maximální rychlosti tepelného srážení odečtené z derivační křivky v závislosti na teplotě [19].

$$v_s = kT + q \quad (49)$$

kde  $v_s$  je maximální rychlost srážení [%/min],  $k$  značí citlivost maximální rychlosti srážení a  $T$  je teplota měření [°C].

#### **2.4.6 EFEKTIVNÍ, MAXIMÁLNÍ A ZBYTKOVÁ TEPELNÁ SRÁŽECÍ SÍLA**

Efektivní tepelná síla je hodnota zjišťovaná za tepelného působení přístroje na textilní délkový vlákenný materiál. Délka vzorku je konstantní. Doporučená doba měření této síly je jedna minuta.

Maximální tepelná srážecí síla udává nejvyšší hodnotu srážecí síly, naměřenou na délkovém vlákenném útvaru, při konstantním napětí a odečtená z celého průběhu zkoušky.

Zbytková srážecí síla je hodnota, která je zajišťována po ukončení tepelného působení přístroje na textilní délkový vlákenný materiál. Vše probíhá volným chladnutím zkoušeného vzorku na teplotu klimatizované laboratoře. Délka vzorku je konstantní a doba měření zbytkové srážecí síly je 0,5 min [19]

### **3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

Cíl této práce spočívá v proměření termických a mechanických vlastností polypropylenového hedvábí, následné zhodnocení naměřených dat a prověření jejich vzájemné závislosti. Experiment byl prováděn na 100% polypropylenovém monofilu a multifilu (obsahujícím 16

fibril) o celkové jemnosti 5,615 tex, který byl postupně zakrucován. Pro všechna měření byly použity klimatizované příze při teplotě 20°C a 65% vlhkosti dle normy EN 20139 (ČSN 80 0056) a měření byla prováděna v klimatizované laboratoři.

### 3.1 JEMNOST PŘÍZE

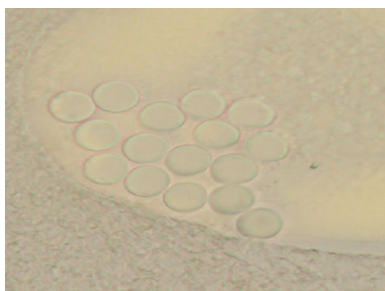
Jemnost vláken je již definována v kapitole 2.2.1. Pro měření byla použita gravimetrická metoda zajištění jemnosti vláken podle normy ČSN EN ISO 2060. Pomocí vijáku bylo odměřeno 5 x 100 metrů polypropylenového multifilu a monofilu. U vzorků se stanovila hmotnost pomocí analytických vah. Dle vztahu (1) byly vypočítány průměrné jemnosti a 95% intervaly spolehlivosti středních hodnot jemnosti.

**Tab. č 4 PŘEHLED JEMNOSTÍ PP MONOFILU A MULTIFILU**

	Jemnost[tex]	95% KI
monofil	2,91	<2,77-2,9>
multifil	5,615	<5,42-5,55>

### 3.2 TVAR PŘÍČNÉHO ŘEZU PP MULTIFILU (viz. kapitola 2. 2. 2)

Byl proveden příčný řez dle IN 46-108-01/01 (Doporučený postup tvorby příčných řezů. Měkké a tvrdé řezy.)

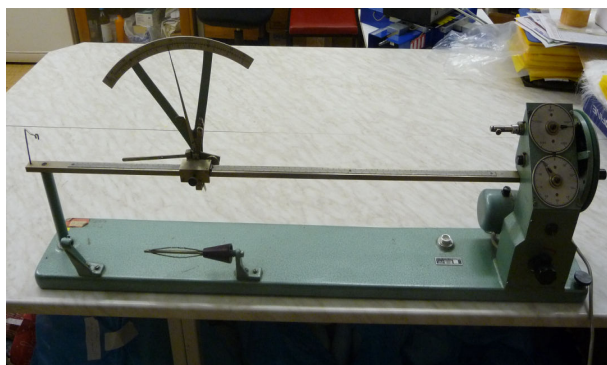


Obr. 11 PP multifil bez zákrutu o jemnosti 5,615 tex obsahující 16 fibril

### 3.4 ZÁKRUT MULTIFILU

Zákrut příze je definován v kapitole 2.3.3. PP multifil se zakrucoval na zákrutoměru, který se skládá ze dvou čelistí, z nichž jedna je otočná. Tato čelist je spojena s počítadlem otáček. Na

zákrutoměru se nastavilo předpětí 1500 mg a upínací délka 60cm. Byl udán počet otáček 100, 400 a 800 ve směru Z dle vztahu (26). Zakroucené příze byly uchopeny na obou koncích do čelistí, které nám umožnily přesun k další zkoušce, aniž by došlo ke změně zákrutu. Součástí zákrutoměru je také měřicí zařízení, které zaznamená rozdíl mezi původní délkou a délkou po zakroucení příze (resp. rozkroucení příze), tyto hodnoty jsou udány v [mm]. Z rozdílů délek bylo vypočteno seskání dle vztahu (36) a jemnost dle vztahu (1) a počet zákrutů na  $[m^{-1}]$ .



Obr. 12 Zákrutoměr



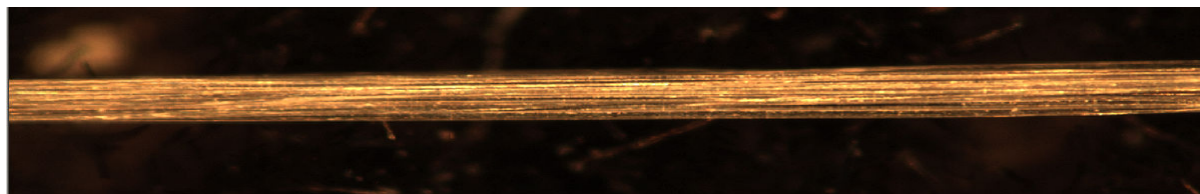
Obr. 13 Držák pro přenos zakroucené příze

Pomocí obrazové analýzy byly nasnímány podélné pohledy multifilů (obr.14 až obr.17). Z pohledů je patrná míra zakroucení svazků. Na snímcích byl v software Nis Elements AR 2.3 naměřen úhel sklonu povrchových vláken a stanoven 95% konfidenční interval. Výsledky jsou uvedeny v tab.(5).

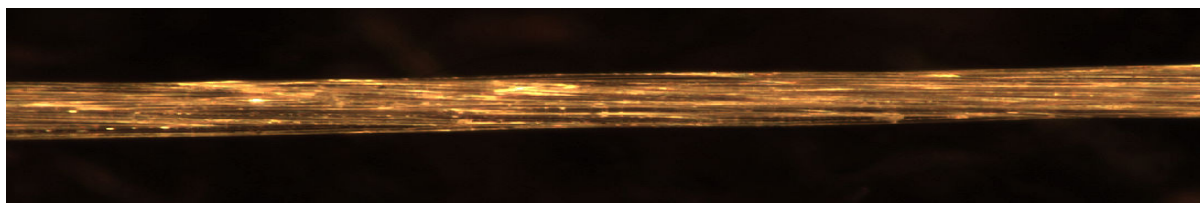
**Tab. č 5 Přehled naměřených a vypočítaných hodnot vláken a vlákenných svazků na jednotlivých zákrutech**

n	Zkrácení [mm]	Seskání [%]	Zákrut [m <sup>-1</sup> ]	Jemnost [tex]	Úhel sklonu vlákna $\beta$ [°]	Reálný úhel sklonu povrch. vlákna $\beta$ [°]	Průměr vlákenného svazku [mm <sup>2</sup> ]	Plocha vláken v řezu [mm <sup>2</sup> ]
0	0	0	0	5,615	0	0	0,0872	0,005973
100	0,2	0,00033	167	5,616	2,615	4,2	0,0872	0,005975
400	3	0,005	667	5,643	10,376	7,6	0,0874	0,006003
800	10,5	0,0175	1333	5,715	20,231	9,96	0,0879	0,00608

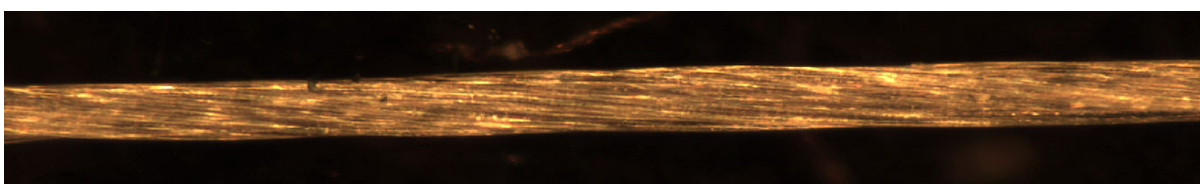
Jemnost [tex] jednotlivých svazků vláken s různými zákruty byla přepočítána dle vztahu  $[T/1-\delta]$ . Průměr vlákenného svazku dle vztahu (20). Porovnáním hodnot úhlu sklonu povrchových vláken  $\beta_{\text{reálná}}$  a  $\beta_{\text{vypočtená}}$ , bylo zjištěno, že dochází ke snížení hodnot  $\beta_{\text{reálná}}$ , tedy neplatí šroubovicový model.



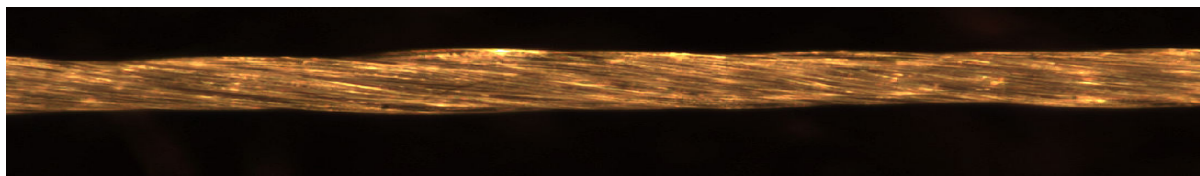
Obr. 14 PP multifil bez zákrutu



Obr. 15 PP multifil se zákrutem 167 [m<sup>-1</sup>]

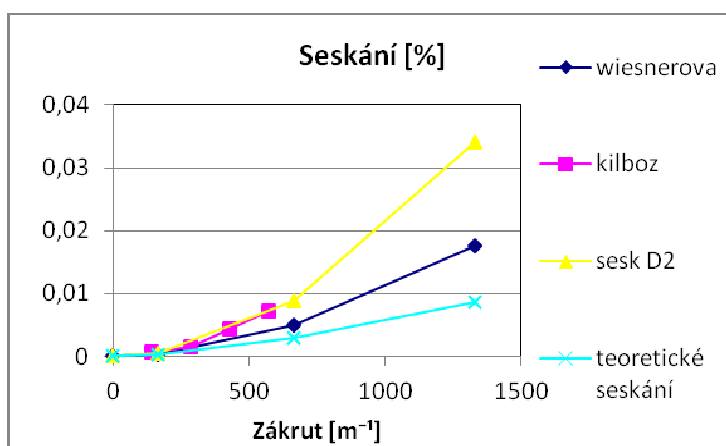


Obr. 16 PP multifil se zákrutem 667 [m<sup>-1</sup>]



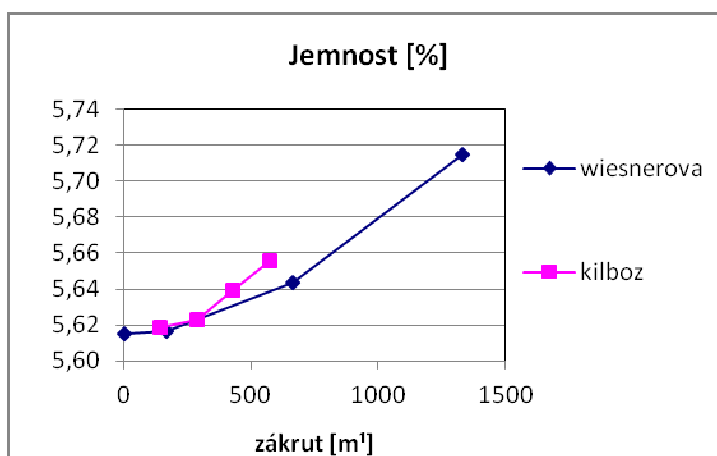
Obr. 17 PP multifil se zákrutem 1333 [m<sup>-1</sup>]

Porovnání seskání bylo provedeno s převzatými daty z práce [22]. Vypočítané průběhy jsou v souladu s naměřenými daty v práci [22], mírné odchylky mohou být způsobeny případnými nepřesnostmi při přenosu zakrouceného vzorku a následným měřením.

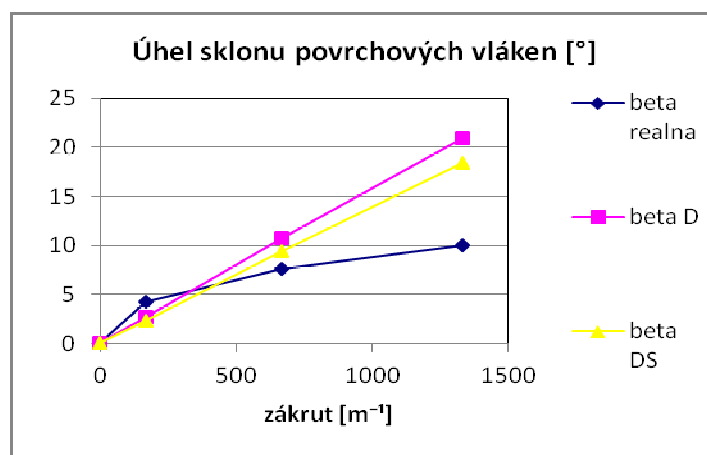


Obr. 18 Porovnání naměřeného seskání multifilu

Seskání na obr.18 bylo vypočteno dle vztahu (35) a je porovnáno s naměřenými průběhy. Data seskání D2 jsou v souladu s hodnotou  $\pi DZ$  u plástové struktury.



Obr. 19 Porovnání jemností vlákenných svazků



Obr. 20 Porovnání úhlů sklonu povrchových vláken

Na obr. 20 je porovnání úhlů sklonu povrchových vláken reálně naměřených ( $\beta$  reálná) s hodnotami stanovenými teoretickým výpočtem pro průměr reálný ( $\beta$  D) a substanční ( $\beta$  DS).

### 3.5 TEPELNÁ SRÁŽIVOST, TEPELNÁ SRÁŽECÍ SÍLA

Tepelná sráživost a tepelná srážecí síla (efektivní, reziduální, maximální) byla měřena na teplotách 50, 70, 90, 100, 120 a 140°C. Rozmezí teplot se stanovilo s ohledem na teplotu skelného přechodu  $[T_g]$  -15 až -18°C a teplotou tání  $[T_t]$  165 až 170°C polypropylenu. Teplotní režim zkoušky byl ve všech měřeních stanoven 1min. tepelného namáhání na konstantní teploty a 0,5min. relaxace (po vyjmutí z tepelné komory). Předpětí bylo stanoveno 1500mg, u každé zkoušky se provedlo 20 měření při dané teplotě.

#### 3.5.1 PŘÍSTROJ TST2

Podstatou zkoušky na tomto přístroji je stanovení tepelné sráživosti (tepelné srážecí síly) vlákna, pásku nebo příze v závislosti na čase s cílem stanovit tepelnou sráživost (tepelnou srážecí sílu) testovaného vzorku pro stanovené teploty [19].



Obr. 21 Přístroj TST2



Teplota pro testování vzorků na tomto přístroji je v rozmezí od 50 do 300°C , relativní změna délky vzorku může být od -80 až do + 500% , možnost předpětí vzorku je od 0 do 500 cN a srážecí síla se pohybuje od 0 do 2000 cN. Přesnost měření přístroje se pohybuje u síly  $\pm 1$  cN, u sráživosti je  $< \pm 0,1$  % a teplota je přesná  $\pm 2^\circ\text{C}$  [19].

### **3.5.2 POSTUP ZKOUŠKY**

Zkouška je rozdělena do tří fází, tj. nastavení parametrů, vlastní měření a zpracování dat.

Při správné kalibraci přístroje se nejprve stiskne tlačítko „ Nastavit sílu“. Na obrazovce se objeví nastavení požadované síly 0 cN ( $\pm 1$  cN). Následně je do obou čelistí vloženo kalibrační závaží a stiskne se tlačítko Reset. Kalibrační kroužek je připevněn na drážku rotačního měřicího čidla sráživosti. Následuje vynulování nastavení na obrazovce. Poté je jednou otočeno kalibračním kroužkem o  $360^\circ$  a následně se kalibrační kroužek nechá ustálit. Na obrazovce se zobrazí hodnota 2000inc ( $\pm 2$  inc) [19].

#### **3.5.2.1 MĚŘENÍ TEPELNÉ SRÁŽIVOSTI PP MULTIFILU**

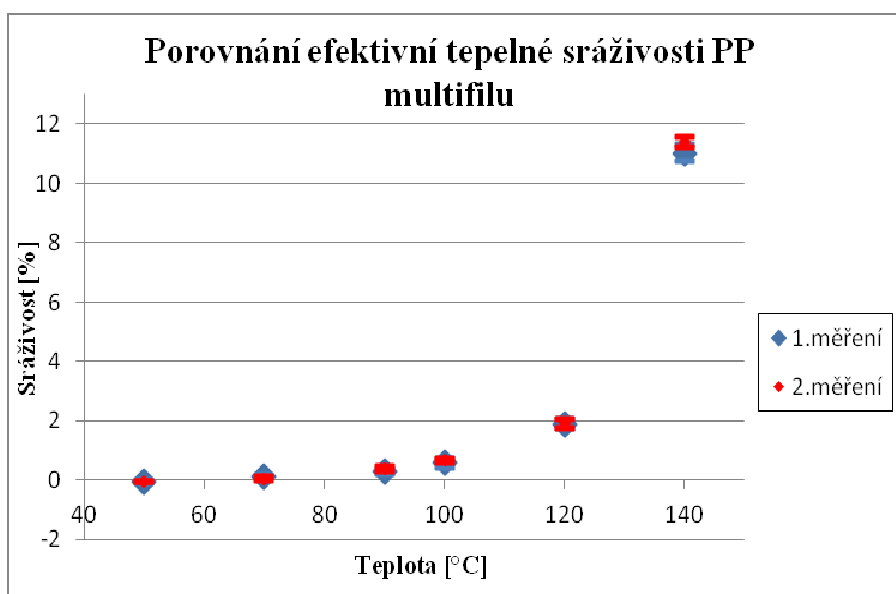
Stanovení tepelné sráživosti vláken je provedeno pevným uchycením vlákna v levé čelisti přístroje a na pravé straně je polypropylenový multifil zatížen pomocí předpětíového závaží na 1500 mg a naveden do drážky rotačního senzoru přístroje. V záložce „parametry“ se poté nastaví režie zkoušky, jako je teplota měření, délka tepelného působení a doba měření po ukončení tepelného působení na vzorek. Tento vzorek se vsune do tepelné komory, kde je nastavena a trvale regulována požadovaná teplota pro měření. Tepelná sráživost PP multifilu je určena z naměřené velikosti délky oblouku, o který se během zahřátí měřeného vzorku otočný mechanismus senzoru otočí, tyto změny délky se registrují pomocí počítače v závislosti na čase. Takto naměřená tepelná sráživost je poté stanovena jako procento změny délky ku délce původní. Protokol se po jednotlivém měření ukládá ve formě PDF a data teplotních křivek jsou uloženy ve formátu txt. a dat.

#### **3.5.2.2 ZPRACOVÁNÍ DAT TEPELNÉ SRÁŽIVOSTI**

Data tepelné sráživosti (maximální, efektivní a zbytkové) jednotlivých teplot se importují do xls. souborů, provede se statistické zpracování a jednotlivé hodnoty maximální, efektivní a

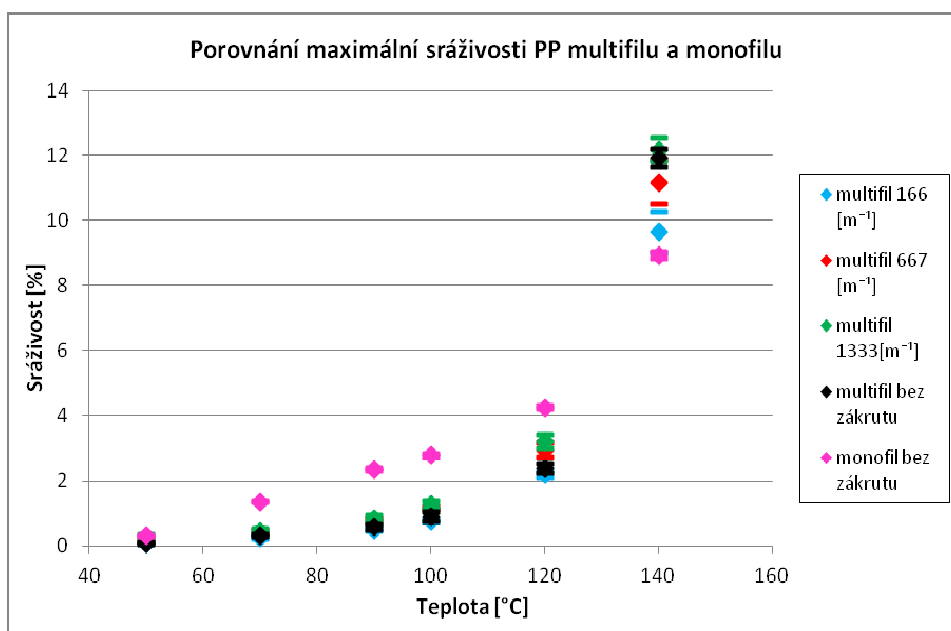
zbytkové sráživosti jsou vyneseny na měřených teplotách. Mezi tabulkovými teplotami skelného přechodu a rekrystalizace je stanovena lineární regrese naměřených hodnot. Pomocí software Matlab jsou vykresleny kinetické srážecí křivky a je stanovena maximální srážecí rychlost, dle rovnice (49), pro celé rozmezí naměřených teplot. Kinetické křivky experimentálních hodnot jsou vyhlazeny pomocí spline a následně derivovány. Hodnoty maximální srážecí rychlosti jsou vyneseny do grafu v závislosti na teplotě a mezi tabulkovými teplotami skelného přechodu a rekrystalizace je stanovena lineární regrese daných hodnot [19].

Nejprve byla proměřena a vyhodnocena maximální, efektivní a zbytková tepelná sráživost PP multifilu bez zákrutu. Tato část experimentu byla zopakována na odlišném místě cívky a byla ověřena reprodukovatelnost dat.

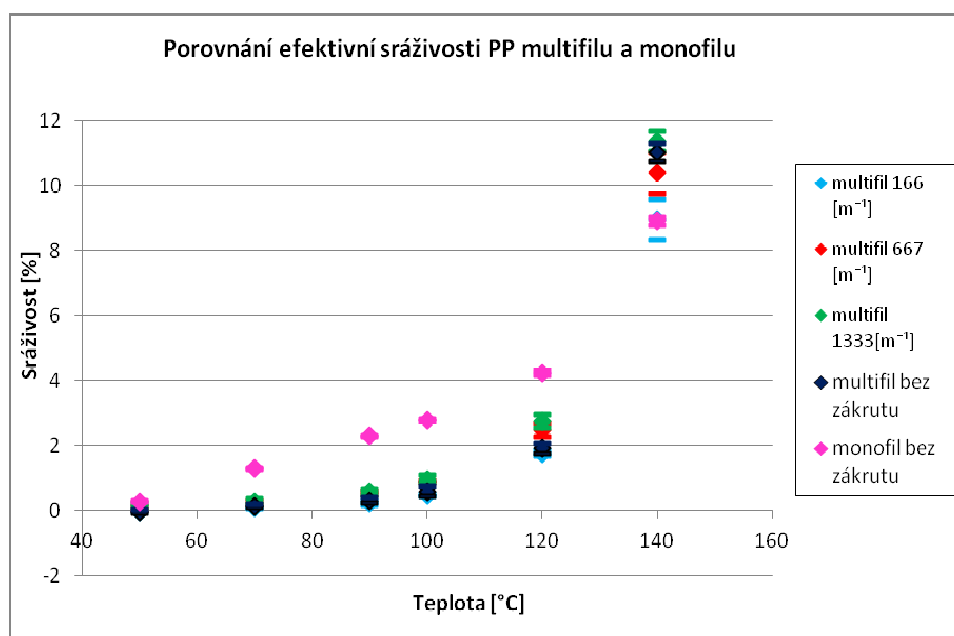


Obr. 22 Porovnání 1. a 2. měření efektivní tepelné sráživosti PP multifilu bez zákrutu.

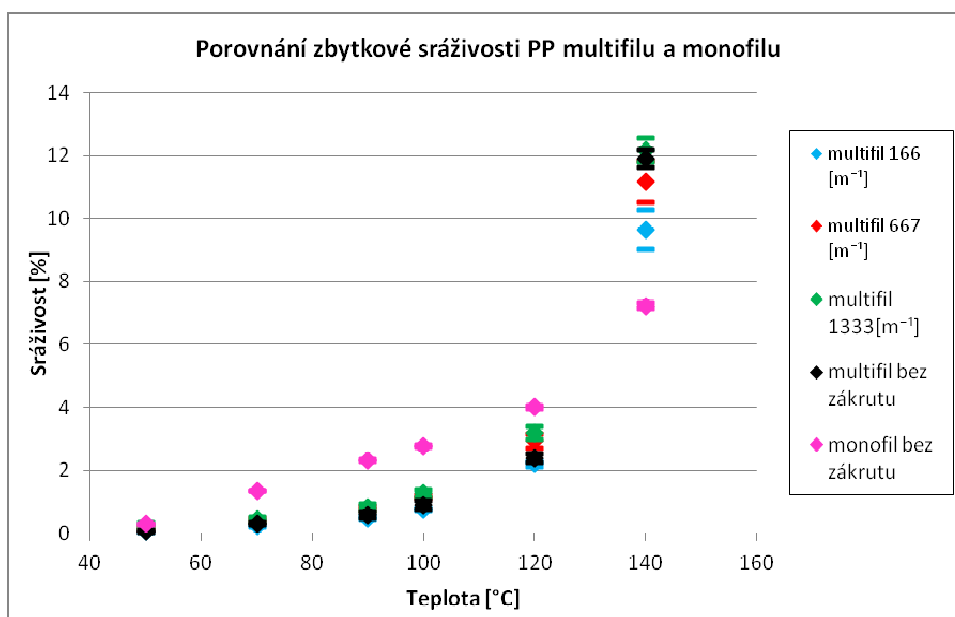
Z tohoto grafu je zřejmý statisticky nevýznamný rozdíl naměřených hodnot.



Obr. 23 Porovnání maximální sráživosti PP multifilu a PP monofilu

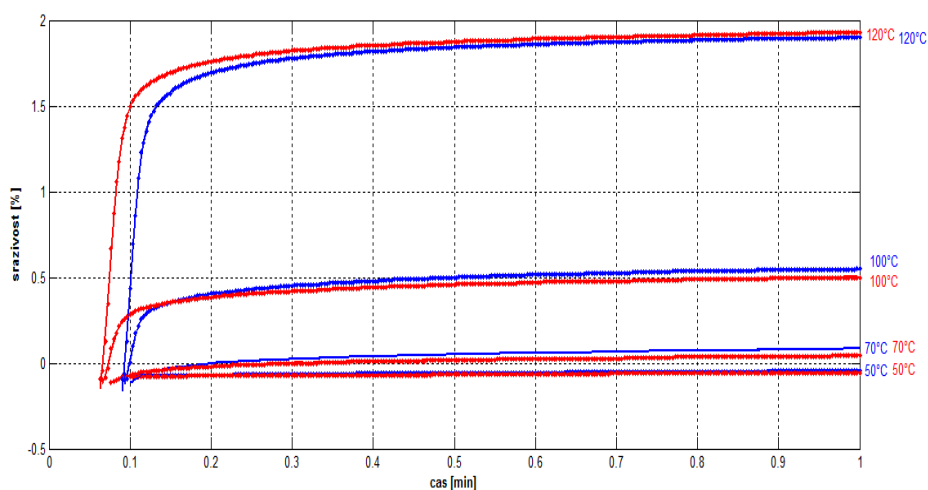


Obr. 24 Porovnání efektivní sráživosti PP multifilu a PP monofilu



Obr. 25 Porovnání zbytkové sráživosti PP multifilu a PP monofilu

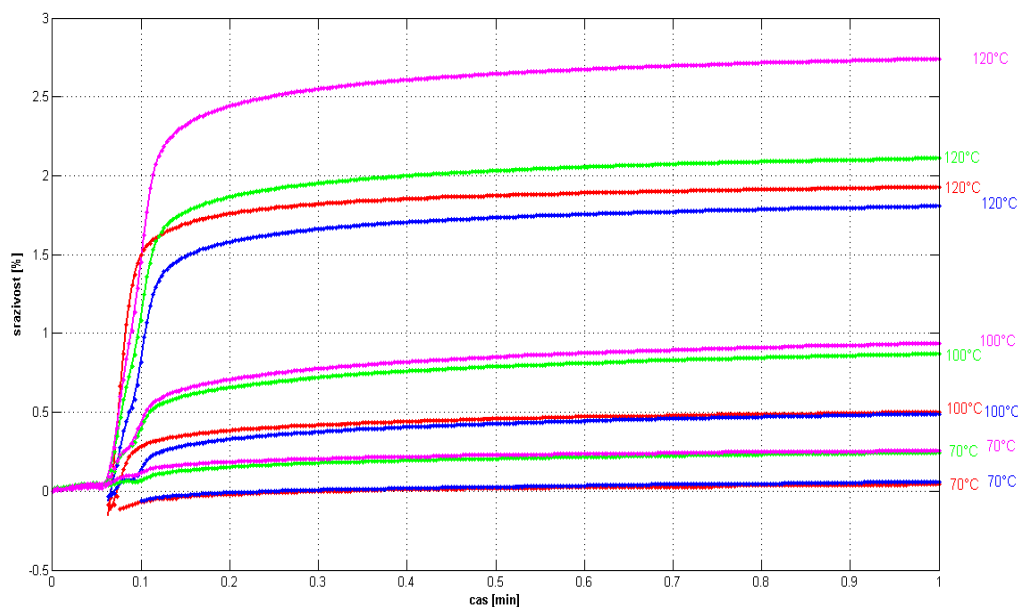
Na obr. 23, 24 a 25 je uvedena maximální, efektivní a zbytková sráživost PP monofilu (2,91tex) a PP multifilu (5,615tex). Rozdíly mezi průběhem maximální, efektivní a zbytkové tepelné sráživosti multifilu v teplotním rozmezí 50-100°C jsou převážně statisticky nevýznamné. Až ve vyšších teplotách dochází k statisticky významnému nárůstu hodnot tepelné sráživosti. V porovnání s měřeným monofilem se multifil sráží méně, ale při 140°C je zde vidět významnější rozdíl. Multifil má relativně vysokou sráživost oproti polypropylenovému monofilu.



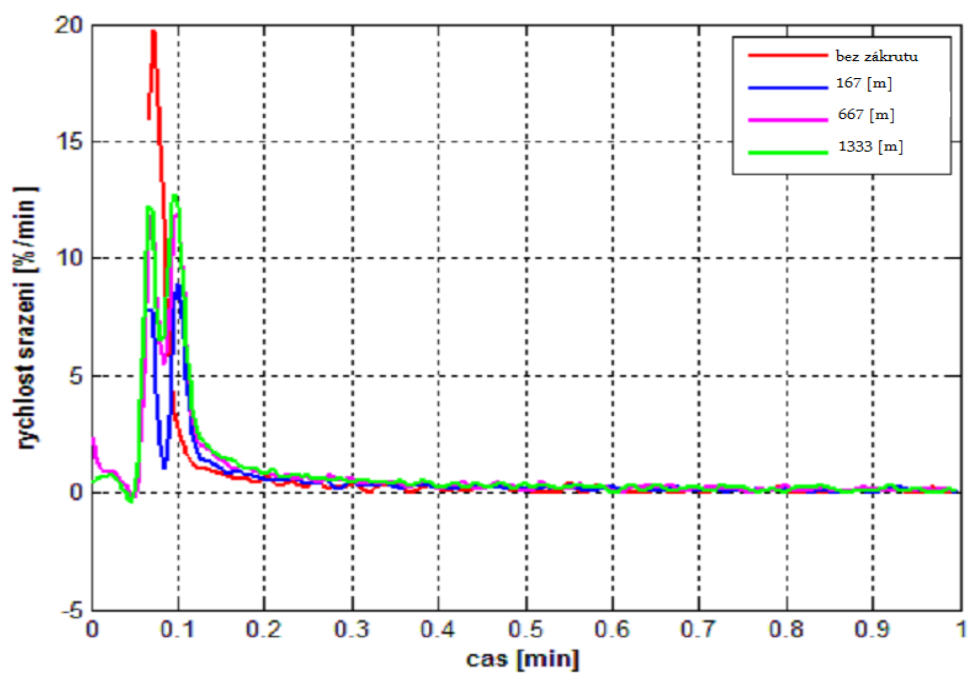
Obr. 26 Porovnání kinetických křivek sráživosti 1. a 2. měření PP multifilu bez zákrutu

(1. měření - , 2. měření -)

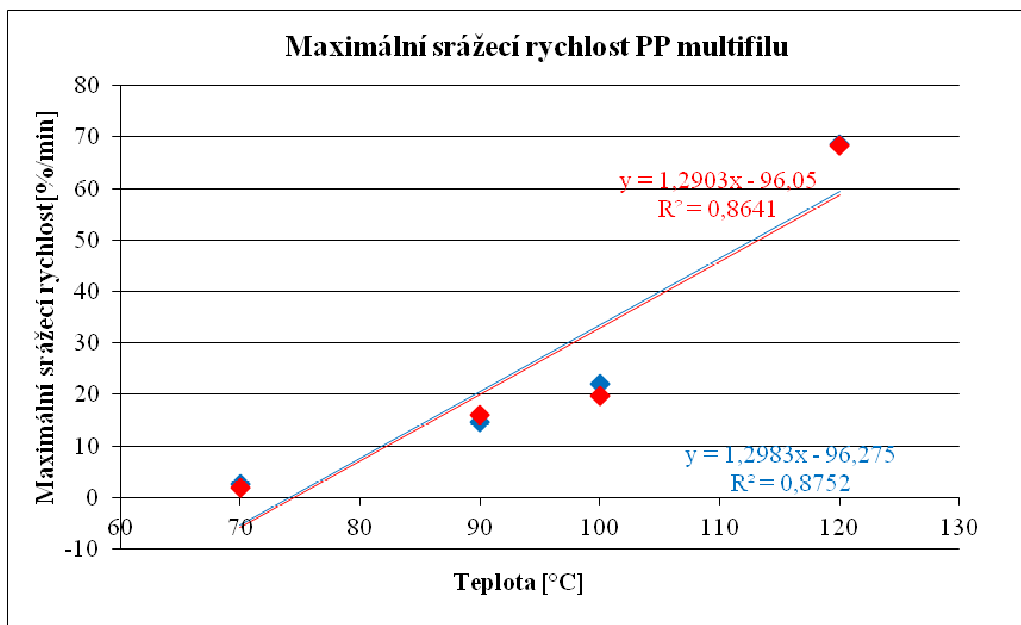
Z křivek průběhu sráživosti (obr. 26) je patrné, že reprodukovatelnost je velmi dobrá. Opět se potvrdilo, že proces srážení je velice rychlý a je spojen s relaxací amorfnní fáze a následné rekrystalizace.



Obr. 27 Porovnání kinetických křivek sráživosti PP multifilu se zákruty 167, 667 a 1333  $[m^{-1}]$  při teplotách 70, 100 a 120°C ( 0 ot./m —, 100 ot./m —, 400 ot./m —, 800 ot./m — )

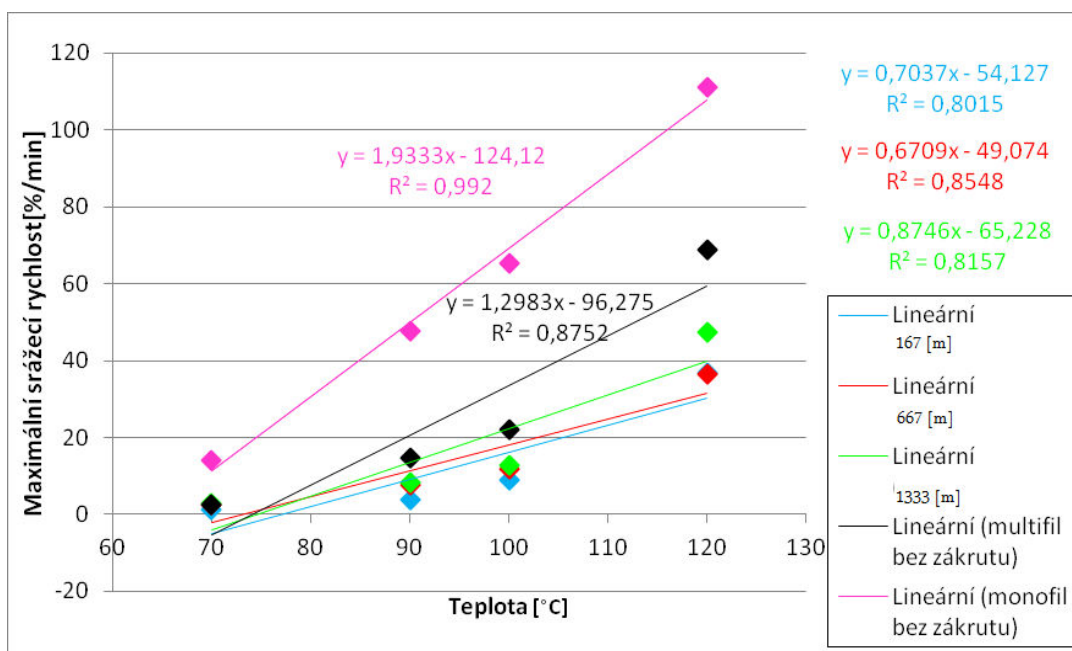


Obr. 28 Rychlost srážení PP multifilu se zákruty 167, 667 a 1333  $[m^{-1}]$  při teplotě 100°C.



Obr. 29 Porovnání maximální srážecí rychlosti (1. měření - , 2. měření -)

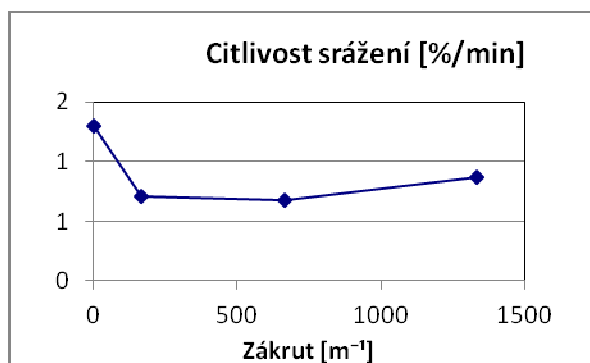
Obr. 29 Z porovnání maximální srážecí rychlosti polypropylenového multifilu bez zákrutu (1. měření - , 2. měření -) je patrný statisticky nevýznamný rozdíl naměřených hodnot.



Obr. 30 Porovnání maximální srážecí rychlost PP monofilu a PP multifilu

Na obr. 30 je znázorněna maximální srážecí rychlost. Při porovnání monofilu s multifilem můžeme pozorovat významný rozdíl, který je patrný mezi vzorky se zákrutem a bez zákrutu.

Maximální srážecí rychlost zakroucených přízí se zákrutem roste. Je však třeba přihlídnout k různým jemnostem přízí multifilu a monofilu.



Obr. 31 Citlivost srážení PP multifilu

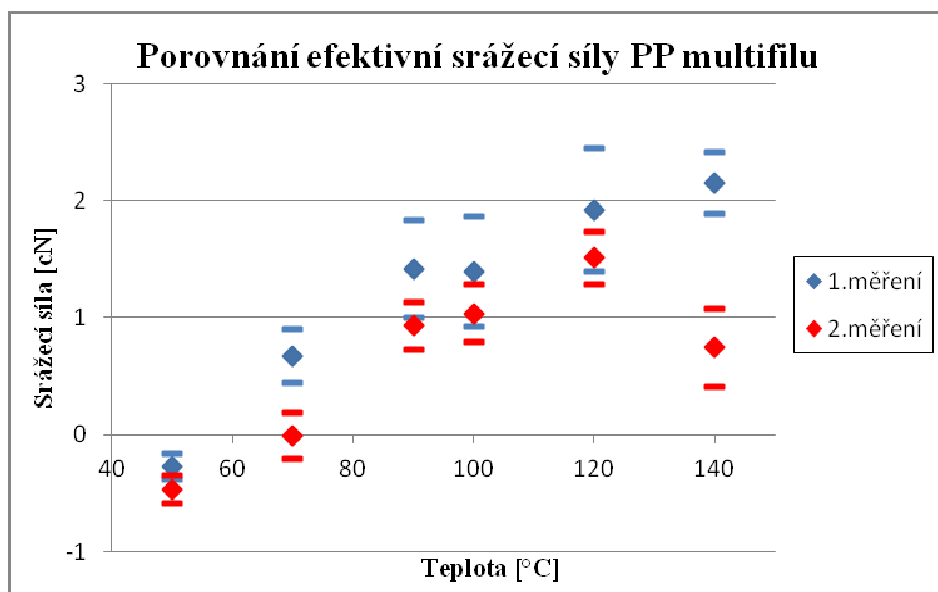
Obr. 31 S rostoucím zákrutem se citlivost srážení zmenšuje a ustaluje. Svazek rovnoběžných vláken bez zákrutu umožňuje vyšší sráživost.

### 3.5.2.3 MĚŘENÍ TEPELNÉ SRÁŽECÍ SÍLY PP MULTIFILU

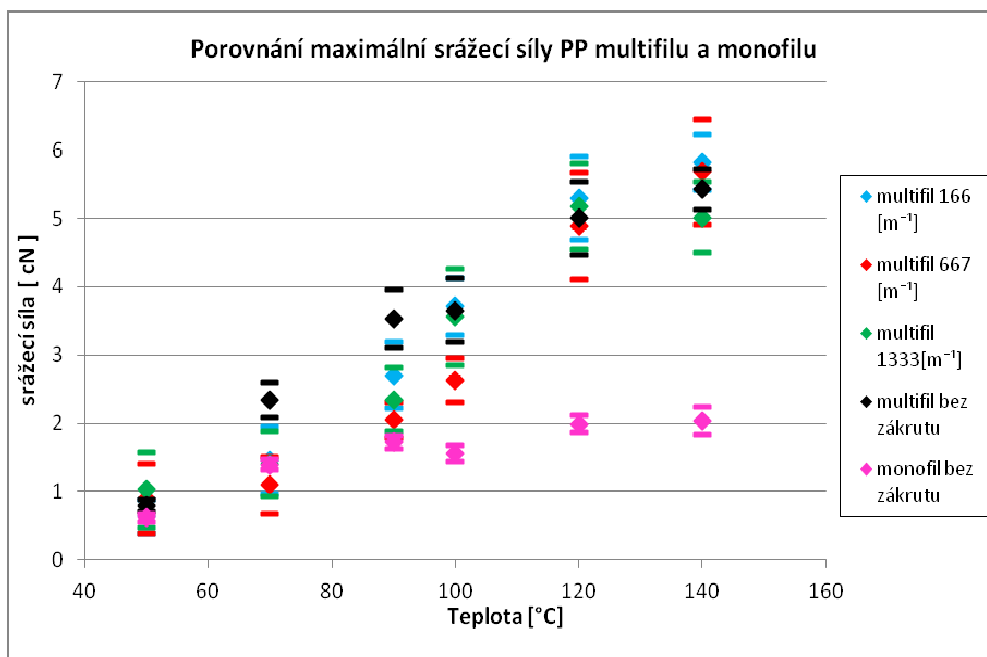
Pro stanovení hodnot tepelné srážecí síly je vzorek pevně uchycen v pravé i levé čelisti přístroje. Stejně napětí všech měřených vzorků je zajištěno pomocí předpětíového závaží, kterým je volný konec PP multifilu zatížen, ještě než je vzorek pevně uchycen do čelistí i na pravé straně přístroje. Dále probíhá kontrola nastavených parametrů či jejich přenastavení na požadovanou teplotu atd. Po vsunutí do tepelné komory se na počítači registruje změna napětí v čase při konstantní délce vzorku. Protokol je stejně jako u tepelné sráživosti ukládán ve formě PDF a jednotlivé teplotní křivky se uloží ve formátu txt. a dat.

### 3.5.2.4 ZPRACOVÁNÍ DAT TEPELNÉ SRÁŽECÍ SÍLY

Data tepelné srážecí síly (maximální, efektivní a zbytkové) jednotlivých teplot jsou importována do xls. souboru, je provedeno statistické zpracování a hodnoty maximální, efektivní a zbytkové srážecí síly jsou vyneseny na měřených teplotách. Mezi tabulkovými teplotami skelného přechodu a rekrytalizace je stanovena lineární regrese naměřených hodnot.

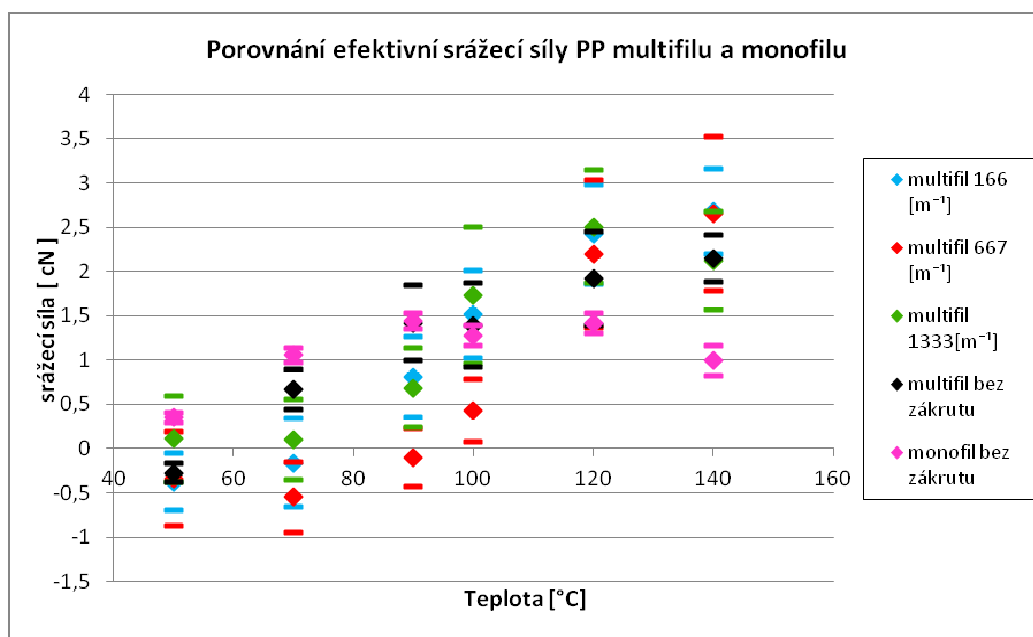


Obr. 32 Porovnání efektivní srážecí síly PP multifilu bez zákrutu po opakovaném přeměření (reprodukovatelnost měření).

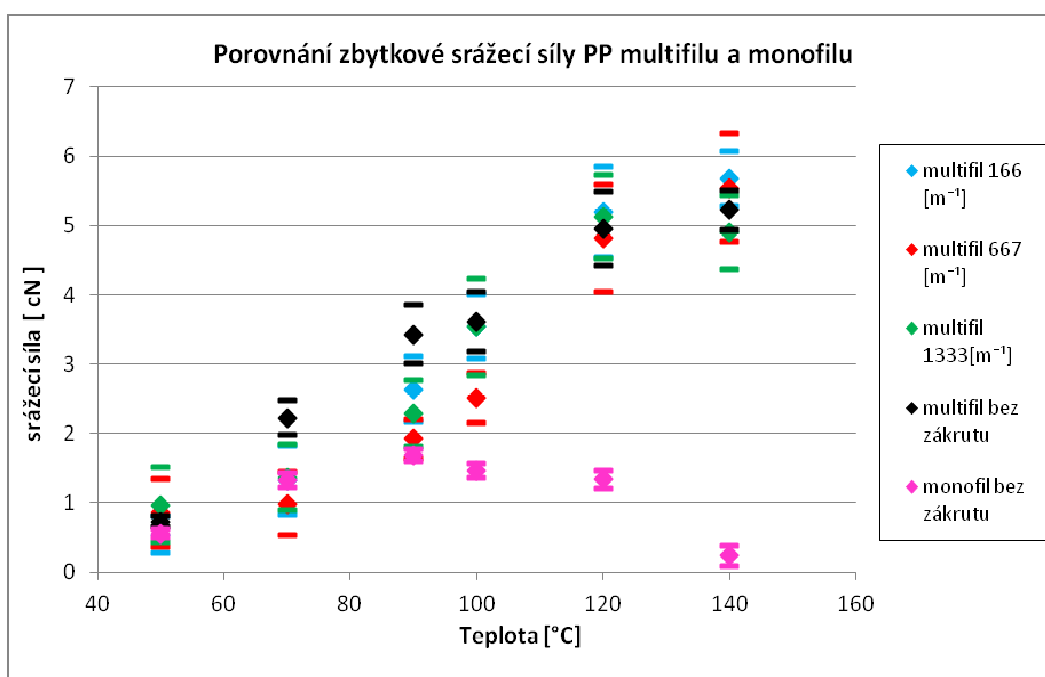


Obr. 33 Porovnání maximální srážecí síly PP multifilu a PP monofilu





Obr. 34 Porovnání efektivní srážecí síly PP multifilu a PP monofilu



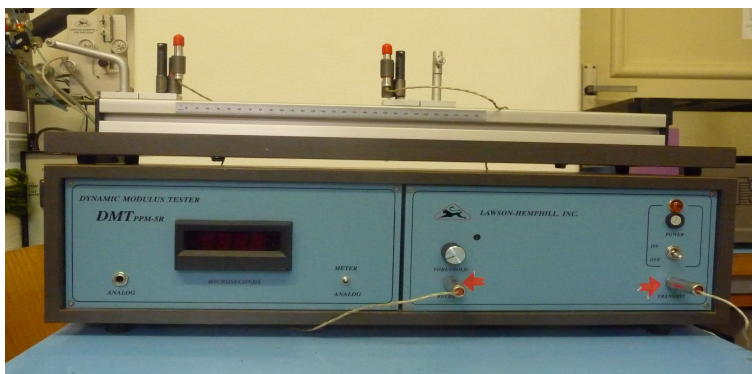
Obr. 35 Porovnání zbytkové srážecí síly PP multifilu a PP monofilu

Na obr. 33, 34 a 35 je znázorněna maximální, efektivní a zbytková srážecí síla PP monofilu a multifilu. U monofilu dochází k poklesu srážecí síly u vyšších teplot než 100°C. Maximální hodnota efektivní srážecí síly při 100°C je daná relativní vysokou srážecí silou při dané

teplotě a ještě poměrně pomalou relaxací napětí srážecí síly. Hodnoty tepelné srážecí síly (maximální, efektivní a zbytkové) multifilu vykazují nárůst. Rozdíly hodnot tepelné srážecí síly jsou v porovnání jednotlivých zákrutů statisticky nevýznamné.

### 3.6 DYNAMICKÝ AKUSTICKÝ MODUL

Dynamic Moduls Tester, neboli DMT, je rychlý a přesný systém na měření zvukové rychlosti skrz příze, vlákenné útvary, tkaniny, papír atd. Fyzikální vlastnosti, které mohou být odvozeny z naměřené rychlosti zvuku je modul pružnosti, molekulární orientace ve vláknech i orientace vláken ve tkanině. Dotkne-li se vzorek po založení do stroje DMT sond, signál je generován. Čas, za který se signál přeneseme mezi snímačem a přijímačem, je změřen a zobrazen na displeji. Tato zkouška může být několikrát opakována s rozdílnou upínací délkou vzorku od 8 do 20 cm[DMT].

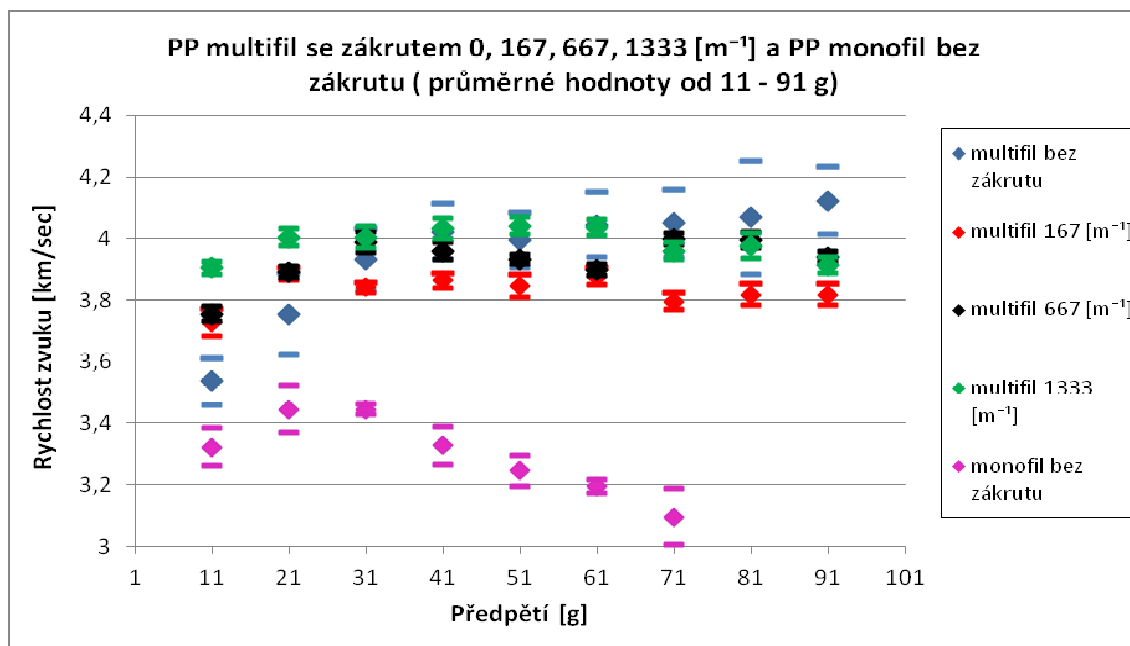


Obr. 36 Přístroj DMT

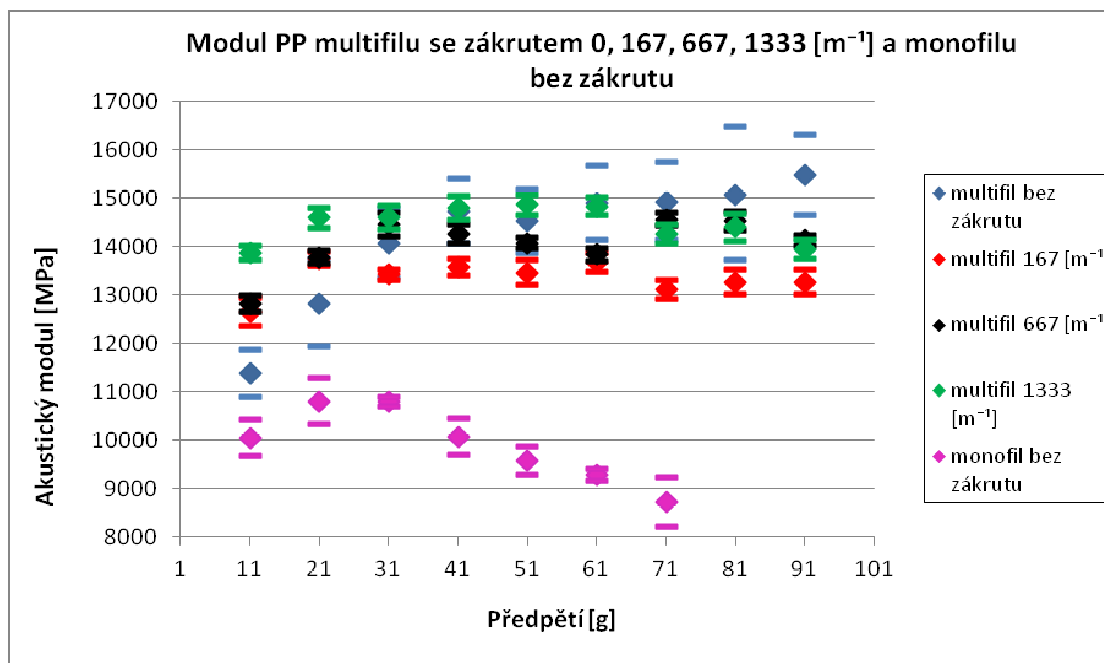
#### 3.6.1 POSTUP ZKOUŠKY

Tato zkouška byla provedena na polypropylenovém monofilu o jemnosti 2,91 tex a PP multifilu o celkové jemnosti 5,615 tex bez zákrutu a se zákrutem 167, 667 a 1333 [m<sup>-1</sup>]. Jednotlivé vzorky byly pevně vloženy do upínací čelisti na pravé straně přístroje a na levé straně se postupně zatížily předpětím 11, 21, 31, 41, 51, 61, 71, 81 a 91 gramů. Vzorky byly navedeny do vodících válečků přístroje a do V- tvarovaných krystalů, kde se nastavilo pomocí připojeného PC zařízení požadované napětí 7 až 9 Voltů. Na digitálním displeji se zobrazila doba přechodu napětí vzorkem v mikrosekundách, která je zapsána a následně se zvětší upínací délka o 1cm, hodnota se zapíše a tento postup je opakován. Každý monofil a multifil

je změřen v rozmezí upínací délky od 10 do 20 cm a dvacetkrát opakován. U hodnot jednotlivých dob přechodu napětí vzorkem byly stanoveny lineární regrese. Data byla statisticky zpracována pomocí programu QC.Expert a vynesena na měřených předpětích.



Obr. 37 Rychlost zvuku PP monofilu bez zákrutu, PP multifilu bez zákrutu a PP multifilu se zákruty 100, 400, 800 otáček na metr



Obr. 38 Dynamický akustický modul

Hodnoty monofilu (obr. 37, 38) vykazují nárůst do zatížení 31 gramů, poté hodnoty akustického modulu vykazují pokles. Akustický modul multifilu vykazuje mírný nárůst, rozdíly hodnot mezi zakrouceným a nezakrouceným vzorkem multifilu nejsou statisticky významné.

### **3.7 PEVNOST, TAŽNOST, TAHOVÉ KŘIVKY**

Podstatou tohoto experimentu bylo získat údaje o mechanických vlastnostech PP multifilu bez zákrutu a se zákruty 167, 667, 1333 [ $\text{m}^{-1}$ ]. Pevnost a tažnost je již definována v kapitole 2.3.5. Postup práce na trhacím přístroji INSTRON 4411 byl realizován v souladu s normou ČSN EN ISO 2062. Podstata zkoušky spočívá v působení síly na testovaný vzorek až do jeho přetrhu. Přístroj Instron se skládá ze dvou čelistí, z nichž jedna je pevná a druhá se pohybuje konstantní rychlostí pro vlákna. Přístroj zaznamenává naměřené údaje, charakterizující tahovou křivku. Mezi tyto naměřené údaje patří pevnost při přetrhu v [N], prodloužení při přetrhu v [mm], energie potřebná pro přetrh v [J] a Youngův modul [N/mm].



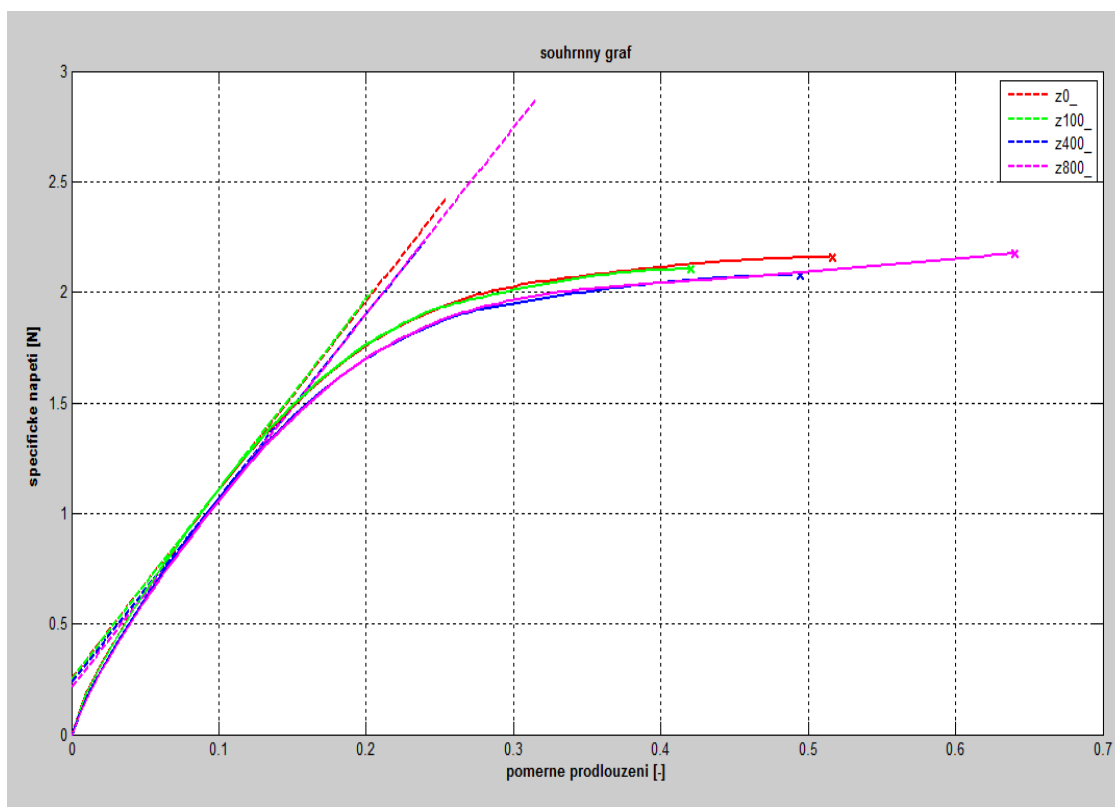
Obr. 39 Přístroj Instron

#### **3. 6. 1. POSTUP ZKOUŠKY**

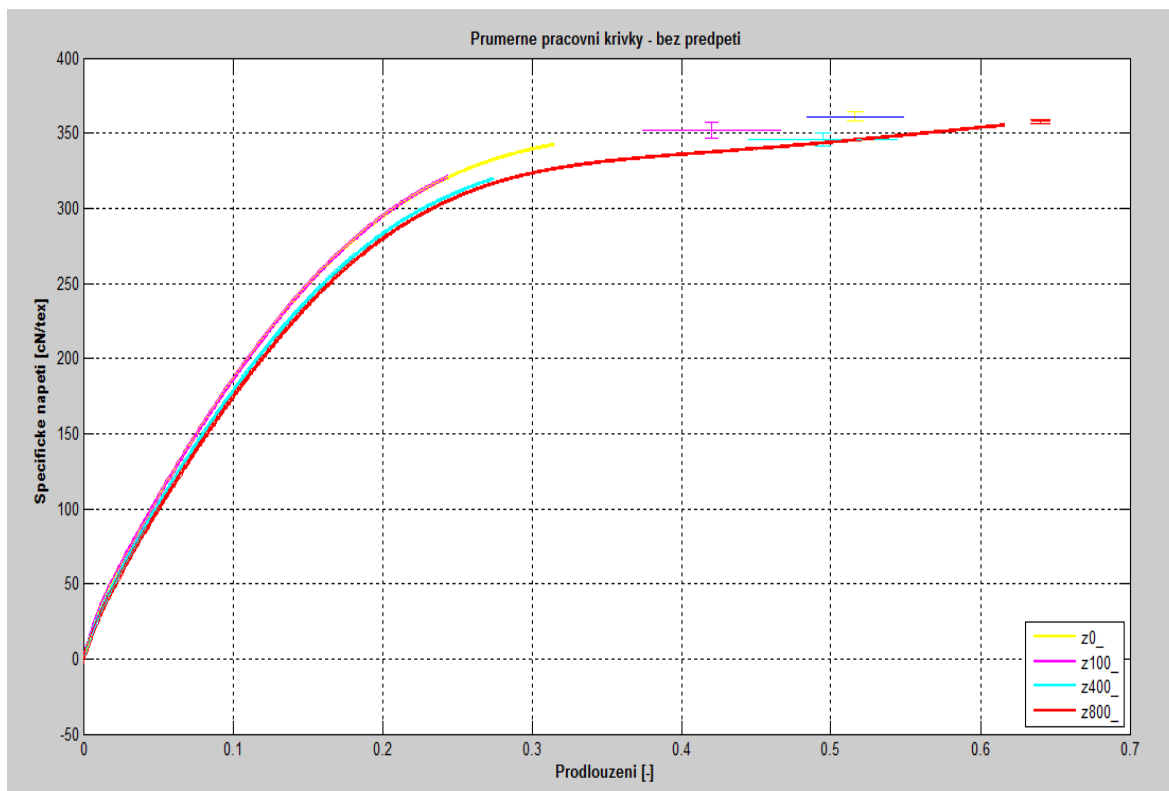
Vzorek byl ručně upnut do speciálních přízových čelistí, jejichž upínací délka byla nastavena na 500mm. Rychlost pohybu čelistí se navolí tak, aby doba trhu byla  $20 \pm 3$  s. Předpětí se

nastavilo dle jemnosti testované příze. Testované vzorky PP multifilu byly do čelistí vkládány pomocí držáku, aby požadovaný zákrut zůstal zachován. Čelisti jsou ovládány sešlápnutím nožního ovladače, první pokyn upevnil přízi v horní čelisti a druhý pokyn uzavřel spodní. Úlohu fixace zákrutů příze v tuto chvíli převzaly čelisti Instronu. Pohyblivá čelist byla uvedena do chodu a zkušební vzorek se napínal až do přetrhu. Maximální síla neboli pevnost a protažení při maximální síle bylo zaznamenáno. Instron má počítačové zařízení pro grafický záznam průběhu zkoušky a naměřené údaje jsou zaznamenávány na pevný disk PC do souborů s příponami per., asc a mad. Z hlediska statistického zpracování dat se každé měření opakovalo 30x.

Naměřená data se nejprve statisticky zpracovala v programu QC.Expert a dále byly vyhodnoceny tahové křivky pomocí software MATLAB.

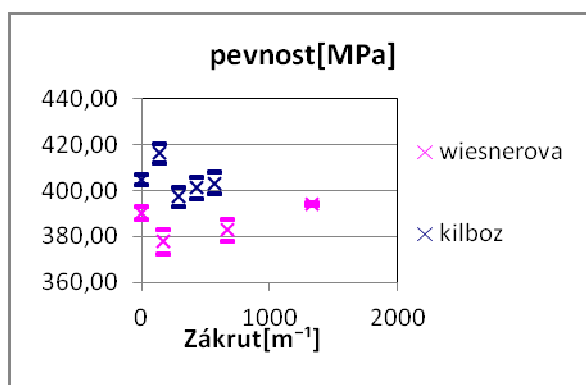


Obr. 40 Tahové křivky PP multifilu



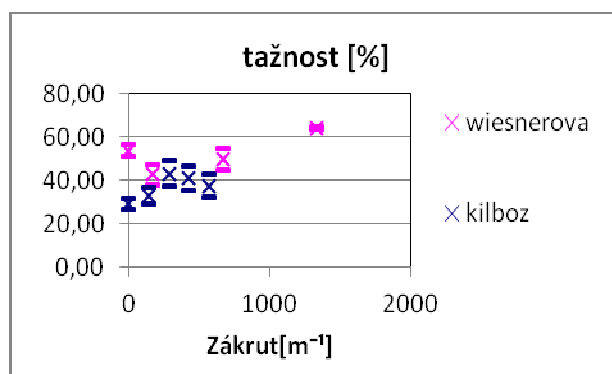
Obr. 41 Průměrné pracovní křivky PP multifilu

Obr. (40, 41) S nárůstem zákrutu PP multifilu nedochází ke statisticky významným změnám pevnosti vzorků, avšak mezi zákruty  $167 \text{ [m}^{-1}\text{]}$  a  $1333 \text{ [m}^{-1}\text{]}$  byly zaznamenány statisticky významné rozdíly hodnot tažnosti. Multifil bez zákrutu vykazuje nevýznamný rozdíl hodnot tažnosti v porovnání s multifilem se zákrutem  $667 \text{ [m}^{-1}\text{]}$ .



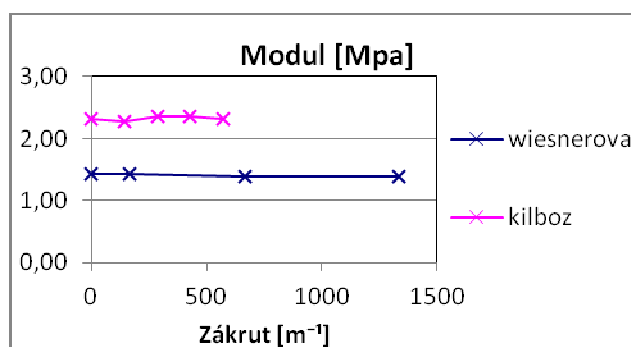
Obr. 42 Porovnání pevnosti PP multifilu

Obr. (42) S růstem zákrutu vlákenného svazku cca do 200[m<sup>-1</sup>] hodnoty kolísají. U dalšího zvýšení zákrutu jsou hodnoty [22] statisticky nevýznamné v porovnání s hodnotami, kde je znatelný nárůst pevnosti. Je známo, že vyšší zákrut vede k většímu úhlu sklonu vláken, což způsobí snížení pevnosti. Tento jev se zde nevyskytuje zřejmě z důvodu nízkých hodnot seskání [8].



Obr. 43 Porovnání tažnosti PP multifilu

Obr. (43) Hodnoty tažnosti jsou převážně statisticky nevýznamné. Hodnoty [22] mají tendenci stoupat do oblasti zákrutu cca 200 [m<sup>-1</sup>] a dále následuje mírný pokles, naměřené hodnoty mají opačný průběh.



Obr. 44 Modul PP multifilu

## 4.ZÁVĚR

V práci byly sledovány geometrické vlastnosti vláken, jako je jemnost, průměr a průřez příze, úhel sklonu povrchových vláken a seskání vlákenného svazku při zákrutech 0, 167, 667 a 1333 [m<sup>-1</sup>]. Dále byly sledovány vlastnosti termické tj. tepelná srážecí síla, tepelná sráživost, kinetické srážecí křivky a maximální srážecí rychlost. Mezi mechanické vlastnosti, které byly zkoumány patří především pevnost, tažnost, tahové křivky, Youngův modul pružnosti, rychlost zvuku ve vláknech a akustický dynamický modul.

Přidáváním ovinů do svazku rovnoběžných vláken bylo dosaženo hodnot seskání cca 2%. Průběh seskání byl porovnán s vybranými modely a s hodnotami uvedenými v práci [22]. Naměřené hodnoty leží mezi modelovými hodnotami seskání vypočítanými dle [8], kde bylo užito zaplnění vypočítané z limitní (plástové) struktury a hodnotami uvedenými v práci [22]. Rozdíl porovnávaných hodnot není statisticky významný.

Při porovnání naměřeného úhlu  $\beta$  sklonu povrchových vláken s vypočítaným úhlem  $\beta$  dle šroubovicového modelu lze konstatovat, že  $\beta$  naměřená (reálná) s vyšším zákrutem klesá. Úhel beta byl ale snímán pouze orientačně. Na druhé straně byl úhel vypočten z intenzity zákrutu, která vychází ze šroubovicového modelu a ve svazku zřejmě nejsou splněny přesné předpoklady. Je třeba ale brát na zřetel různé pracovní postupy, případnou možnost mírného rozkroucení vlákenného svazku při další manipulaci.

S rostoucím zákrutem nedochází k poklesu pevnosti vlivem sklonu vláken, hodnoty kolísají, až se ustalují. To je způsobeno zřejmě malým seskáním. Tomu odpovídá i průběh tažnosti, modul se nemění.

Hodnoty rychlosti zvuku vykazují s rostoucím zákrutem statisticky nevýznamné rozdíly. Domníváme se, že je to způsobeno vlivem nízkého seskání.

U tepelné sráživosti bylo prokázáno, že nezpevněný rovnoběžný svazek vláken má větší tendenci se srážet, než zakroucený vlákenný svazek, kde je vyšší hodnota tření a nižší procento sráživosti.



## 5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Piller B., Levinský O. **Malá Encyklopedie textilních materiálů**. 2. Vyd Praha 1982
- [2] Pajgrt O., Reichstädter B., Ševčík F. a kolektiv. **Polypropylenová vlákna**. 1. Vyd SNTL Praha 1977
- Makatura, M. *Pevnost bavlněných přízí*. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Liberec 2006.
- [3] Sedláčková J. **Pevnost přízí z polypropylenů**. Diplomová práce. Liberec 2008
- [4] Militký J. **Textilní vlákna**. 1. vyd. Liberec 2002. ISBN 80-7083-644-X.
- [5] Wiener J. **Chemicko-textilní rozbor**, technická univerzita v Liberci 2008
- [6] Militký J. přednášky k předmětu **Vlastnosti vláken**. Technická univerzita v Liberci
- [7] Ursíny P. **Předení I**. 1. vyd. Liberec 2001. ISBN 80-7083-481-1
- [8] Neckář, B. **Přednášky předmětu Struktura a vlastnosti textilií**. Liberec 2006.
- [9] Dostálová M., Křivánková M. **Základy textilní a oděvní výroby**. 2. vyd. Liberec 2001. ISBN 80-7083-504-4.
- [10] Interní norma č.46-108-01/01: **Doporučený postup tvorby příčných řezů**
- [11] Vaníček J. Přednášky k předmětu **Vlastnosti vláken**. Technická univerzita v Liberci
- [12] čsn 80 0073
- [13] Křemenáková D. soubor přednášek **Textilie v novém tisíciletí VIII** 29.10.2010 FT TUL Liberec
- [14] Papšíková P. Diplomová práce **Mechanické vlastnosti svazků vláken**. Technická univerzita v Liberci 2008
- [15] [http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060322111958/-mechanické\\_vlastnosti.pdf](http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060322111958/-mechanické_vlastnosti.pdf)
- [16] Kolektiv – A Statistical Model and Experimental Study of the Strain-rate Dependence of the Strength of Fibrex, Composites Science and Technology, Vol. 52, 1995
- [17] Jirsák O. **Netkané textilie**. Technická univerzita v Liberci
- [18] Vaníček J. **Teorie termických metod**. Technická univerzita v Liberci

[19] Křemenáková D., Militký J., Košátková Hušková M. Závěrečná výzkumná zpráva. TUL 2009

[20] Neckář, B. Příže: **Tvorba, struktura, vlastnosti**. 1. vyd. SNTL Praha 1990. ISBN 80-03-00213-3.

[21] Křemenáková D., Pivoňková D., **Prediction of yarn packing density and strength**, 5th Internat. Textile clothing design conf. Dubrovnik 2010, Croatia

[22] Křemenáková D., Militký J., Ibrahim Kilboz **Structure and mechanical behavior of polypropylene yarns**, Department of Textile Technology, Textile Faculty, Technical University, Liberec, Czech Republic

## **6. SEZNAM PŘÍLOH**

**PŘÍLOHA č.1:** Tabulky hodnot a grafy měření na přístroji TST2

**PŘÍLOHA č.2:** Tabulky hodnot měření na přístroji DMT

**PŘÍLOHA č.3:** Tahové křivky z trhacího přístroje Instron

### **PŘÍLOHA č.1:**

**Tepelná sráživost PP multifilu 0, 100, 400 a 800 ot./m a PP monofilu bez zákrutu**

Tab. 6.1.1 Efektivní tepelná sráživost – multifil 0 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	-0,04	0,125	0,3	0,575	1,905	11,02
Spodní mez (5%) :	-0,08128	0,07684	0,21744	0,42333	1,75333	10,74804
Horní mez (95%) :	0,00128	0,17316	0,38256	0,72667	2,05667	11,29196

Tab. 6.1.2 Efektivní tepelná sráživost – multifil 100 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	-0,045	0,07	0,22	0,46	1,76	8,955
Spodní mez (5%) :	-0,06859	0,04112	0,15934	0,41668	1,66614	8,33829

Horní mez (95%) :	-0,02141	0,09888	0,28066	0,50332	1,85386	9,57171
-------------------	----------	---------	---------	---------	---------	---------

Tab. 6.1.3 Efektivní tepelná sráživost – multifil 400 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,055	0,235	0,535	0,875	2,48	10,395
Spodní mez (5%) :	-0,02081	0,16423	0,48085	0,83711	2,26	9,75807
Horní mez (95%) :	0,13081	0,30577	0,58915	0,91289	2,69	11,03193

Tab. 6.1.4 Efektivní tepelná sráživost – multifil 800 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,155	0,275	0,56	0,965	2,74	11,365
Spodní mez (5%) :	0,07075	0,19919	0,46614	0,84587	2,53062	11,05767
Horní mez (95%) :	0,23925	0,35081	0,65386	1,08413	2,94938	11,67233

Tab. 6.1.5 Efektivní tepelná sráživost – monofil 0 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,27	1,29	2,285	2,775	4,23	8,91
Spodní mez (5%) :	0,25652	1,2748	2,26141	2,73119	4,17608	8,78726
Horní mez (95%) :	0,28348	1,3052	2,30859	2,81881	4,28392	9,03274

Tab. 6.1.6 Zbytková (reziduální) tepelná sráživost – multifil 0 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,07	0,31	0,575	0,89	2,385	11,895
Spodní mez (5%) :	0,04248	0,26872	0,48556	0,75402	2,24379	11,62827
Horní mez (95%) :	0,09752	0,35128	0,66444	1,02598	2,52621	12,16173

Tab. 6.1.7 Zbytková (reziduální) tepelná sráživost – multifil 100 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,07	0,24	0,49	0,76	2,205	9,64
Spodní mez (5%) :	0,04304	0,21112	0,44282	0,70946	2,10753	9,01318
Horní mez (95%) :	0,09696	0,26888	0,53718	0,81054	2,30247	10,26682

Tab. 6.1.8 Zbytková (reziduální) tepelná sráživost – multifil 400 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,145	0,415	0,795	1,155	2,94	11,16
Spodní mez (5%) :	0,06919	0,35097	0,73363	1,10869	2,71	10,49274

Horní mez (95%) :	0,22081	0,47903	0,85637	1,20131	3,16	11,82726
-------------------	---------	---------	---------	---------	------	----------

Tab. 6.1.9 Zbytková (reziduální) tepelná sráživost – multifil 800 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,26	0,46	0,83	1,265	3,2	12,185
Spodní mez (5%) :	0,17238	0,3878	0,72892	1,14587	2,99784	11,81031
Horní mez (95%) :	0,34762	0,5322	0,93108	1,38413	3,40216	12,55969

Tab. 6.1.10 Zbytková (reziduální) tepelná sráživost – monofil 0 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,295	1,35	2,335	2,78	4,005	7,22
Spodní mez (5%) :	0,28489	1,3348	2,30467	2,73956	3,96793	7,13336
Horní mez (95%) :	0,30511	1,3652	2,36533	2,82044	4,04207	7,30664

Tab. 6.1.11 Maximální tepelná sráživost – multifil 0 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,07	0,31	0,575	0,89	2,385	11,935
Spodní mez (5%) :	0,04248	0,26872	0,48556	0,75402	2,24379	11,65781
Horní mez (95%) :	0,09752	0,35128	0,66444	1,02598	2,52621	12,21219

Tab. 6.1.12 Maximální tepelná sráživost – multifil 100 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,07	0,24	0,49	0,76	2,205	9,645
Spodní mez (5%) :	0,04304	0,21112	0,44282	0,70946	2,10753	9,01481
Horní mez (95%) :	0,09696	0,26888	0,53718	0,81054	2,30247	10,27519

Tab. 6.1.13 Maximální tepelná sráživost – multifil 400 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,145	0,415	0,795	1,155	2,935	11,18
Spodní mez (5%) :	0,06919	0,35097	0,73363	1,10869	2,71187	10,49926
Horní mez (95%) :	0,22081	0,47903	0,85637	1,20131	3,15813	11,86074

Tab. 6.1.14 Maximální tepelná sráživost – multifil 800 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,26	0,46	0,83	1,265	3,2	12,185
Spodní mez (5%) :	0,17238	0,3878	0,72892	1,14587	2,99784	11,81031

Horní mez (95%) :	0,34762	0,5322	0,93108	1,38413	3,40216	12,55969
-------------------	---------	--------	---------	---------	---------	----------

Tab. 6.1.15 Maximální tepelná sráživost – monofil 0 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,295	1,35	2,335	2,785	4,245	8,945
Spodní mez (5%) :	0,28489	1,3348	2,30467	2,74119	4,19445	8,84031
Horní mez (95%) :	0,30511	1,3652	2,36533	2,82881	4,29555	9,04969

### **Tepelná srážecí síla PP multifilu 0, 100, 400 a 800 ot./m a PP monofilu bez zákrutu**

Tab. 6.1.16 Efektivní tepelná srážecí síla – multifil 0 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	-0,275	0,67	1,42	1,395	1,92	2,15
Spodní mez (5%) :	-0,38621	0,44084	1,00212	0,91983	1,39428	1,88286
Horní mez (95%) :	-0,16379	0,89916	1,83788	1,87017	2,44572	2,41714

Tab. 6.1.17 Efektivní tepelná srážecí síla – multifil 100 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	-0,375	-0,16	0,81	1,515	2,42	2,675
Spodní mez (5%) :	-0,70189	-0,65876	0,35168	1,01961	1,85384	2,1924
Horní mez (95%) :	-0,04811	0,33876	1,26832	2,01039	2,98616	3,1576

Tab. 6.1.18 Efektivní tepelná srážecí síla – multifil 400 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	-0,34	-0,55	-0,1	0,43	2,2	2,655
Spodní mez (5%) :	-0,87246	-0,94766	-0,43026	0,07278	1,36424	1,78217
Horní mez (95%) :	0,19246	-0,15234	0,23026	0,78722	3,03576	3,52783

Tab. 6.1.19 Efektivní tepelná srážecí síla – multifil 800 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,11	0,1	0,685	1,73	2,505	2,12
Spodní mez (5%) :	-0,37528	-0,35158	0,23679	0,96164	1,86807	1,56732
Horní mez (95%) :	0,59528	0,55158	1,13321	2,49836	3,14193	2,67268

Tab. 6.1.20 Efektivní tepelná srážecí síla – monofil 0 ot./m

teplota °C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,35	1,055	1,44	1,275	1,415	0,995

Spodní mez (5%) :	0,29224	0,97075	1,35238	1,16379	1,29705	0,82313
Horní mez (95%) :	0,40776	1,13925	1,52762	1,38621	1,53295	1,16687

Tab. 6.1.21 Zbytková (reziduální) tepelná srážecí síla – multifil 0 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,73	2,225	3,43	3,615	4,955	5,225
Spodní mez (5%) :	0,64912	1,97225	3,00538	3,18027	4,41917	4,93981
Horní mez (95%) :	0,81088	2,47775	3,85462	4,04973	5,49083	5,51019

Tab. 6.1.22 Zbytková (reziduální) tepelná srážecí síla – multifil 100 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,54	1,33	2,64	3,545	5,195	5,675
Spodní mez (5%) :	0,2704	0,83124	2,17494	3,08331	4,53785	5,276
Horní mez (95%) :	0,8096	1,82876	3,10506	4,00669	5,85215	6,074

Tab. 6.1.23 Zbytková (reziduální) tepelná srážecí síla – multifil 400 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,855	0,985	1,92	2,515	4,81	5,545
Spodní mez (5%) :	0,35961	0,53005	1,63692	2,15441	4,0349	4,75979
Horní mez (95%) :	1,35039	1,43995	2,20308	2,87559	5,5851	6,33021

Tab. 6.1.24 Zbytková (reziduální) tepelná srážecí síla – multifil 800 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,97	1,365	2,285	3,535	5,13	4,9
Spodní mez (5%) :	0,42406	0,89657	1,80309	2,83741	4,53014	4,36754
Horní mez (95%) :	1,51594	1,83343	2,76691	4,23259	5,72986	5,43246

Tab. 6.1.25 Zbytková (reziduální) tepelná srážecí síla – monofil 0 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,56	1,325	1,68	1,46	1,335	0,235
Spodní mez (5%) :	0,50224	1,22727	1,59238	1,35216	1,20357	0,08335
Horní mez (95%) :	0,61776	1,42273	1,76762	1,56784	1,46643	0,38665

Tab. 6.1.26 Maximální tepelná srážecí síla – multifil 0 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,795	2,335	3,53	3,655	5	5,425
Spodní mez (5%) :	0,70401	2,08225	3,09864	3,19331	4,4608	5,12537
Horní mez (95%) :	0,88599	2,58775	3,96136	4,11669	5,5392	5,72463

Tab. 6.1.27 Maximální tepelná srážecí síla – multifil 100 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
-----------	-----------	-----------	-----------	------------	------------	------------

Střední hodnota :	0,635	1,46	2,7	3,71	5,295	5,815
Spodní mez (5%) :	0,38899	0,96798	2,21472	3,29212	4,68503	5,4084
Horní mez (95%) :	0,88101	1,95202	3,18528	4,12788	5,90497	6,2216

Tab. 6.1.28 Maximální tepelná srážecí síla – multifil 400 ot./m

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,895	1,095	2,045	2,635	4,885	5,68
Spodní mez (5%) :	0,38613	0,68049	1,78551	2,31485	4,10653	4,91164
Horní mez (95%) :	1,40387	1,50951	2,30449	2,95515	5,66347	6,44836

Tab. 6.1.29 Maximální tepelná srážecí síla – multifil 800 ot./m

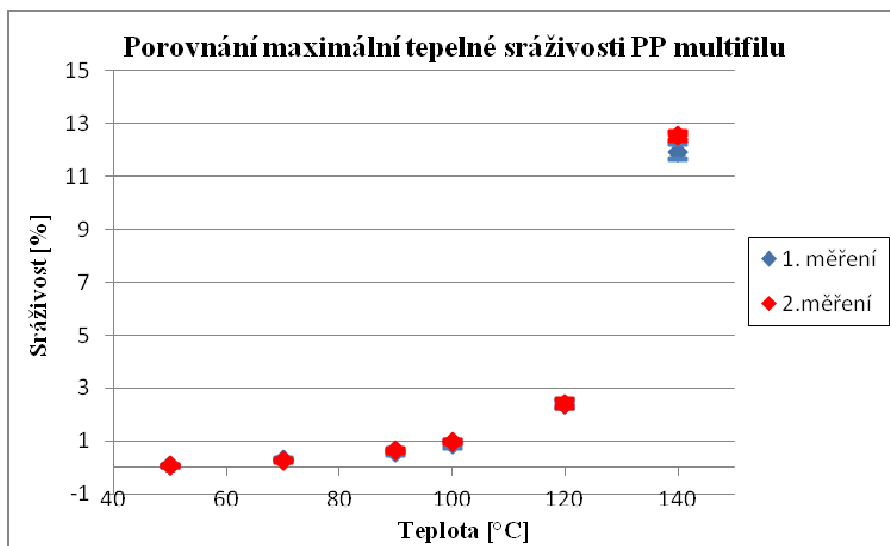
teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	1,025	1,41	2,345	3,555	5,17	5,01
Spodní mez (5%) :	0,46895	0,9382	1,87657	2,85741	4,54318	4,49102
Horní mez (95%) :	1,58105	1,8818	2,81343	4,25259	5,79682	5,52898

Tab. 6.1.30 Maximální tepelná srážecí síla – monofil 0 ot./m

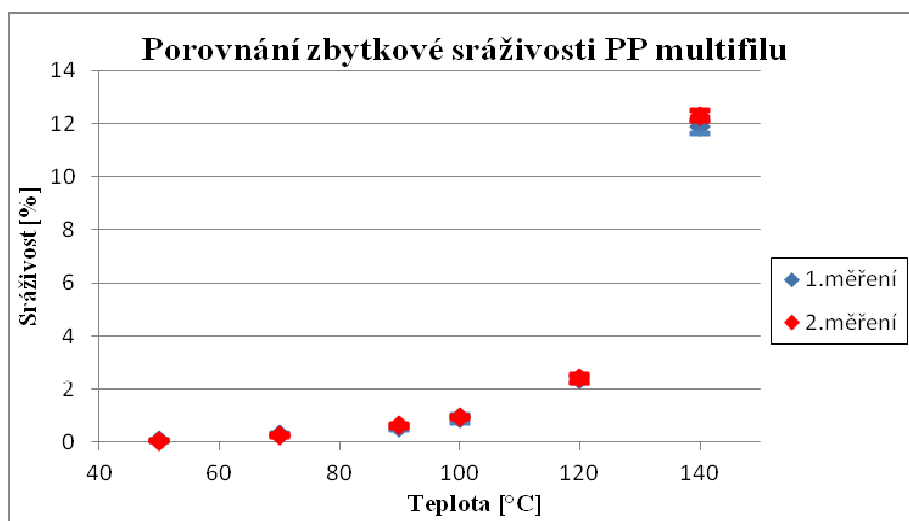
teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
Střední hodnota :	0,62	1,395	1,725	1,56	1,99	2,03
Spodní mez (5%) :	0,56224	1,31749	1,63401	1,43868	1,86194	1,8278
Horní mez (95%) :	0,67776	1,47251	1,81599	1,68132	2,11806	2,2322

Tab. 6.1.31 Maximální rychlost srážení

teplota°C	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>100</b>	<b>120</b>	<b>140</b>
100 ot./metr-multi	0,1782	1,1964	3,9493	8,9551	36,7861	266,534
400 ot./metr-multi	1,1354	2,5612	7,5919	11,9114	36,5845	282,8165
800 ot./metr-multi	1,3762	2,8995	8,2927	12,7539	47,4859	281,3199
multifil bez zákrutu	0,2202	2,6505	14,7707	22,153	68,6868	623,3558
monofil bez zákrutu	1,8	14,1	47,7	65,27	111,12	226,61

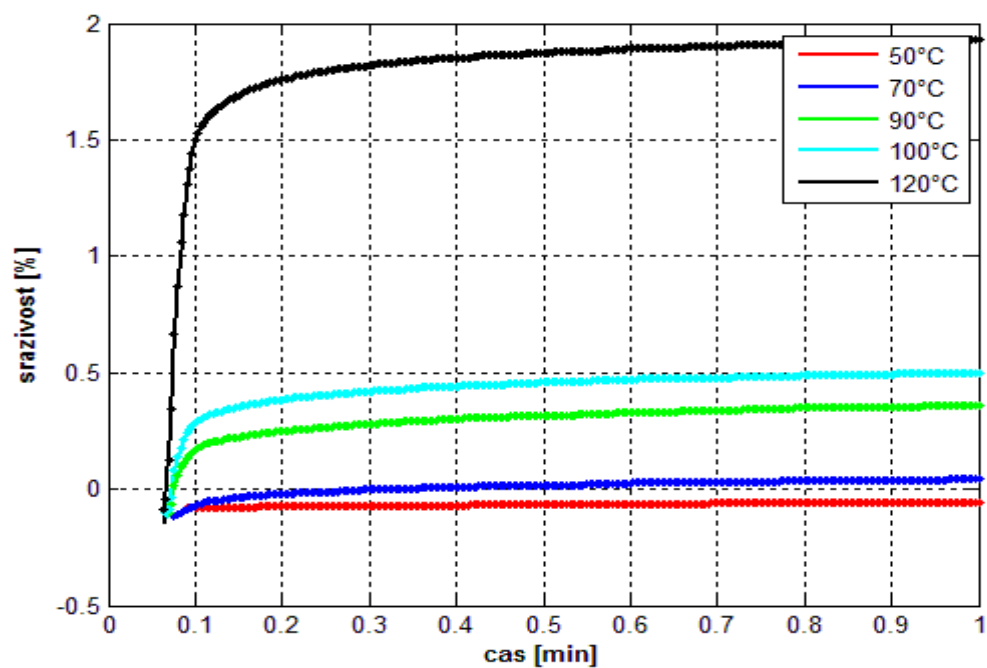


Obr. 1 Porovnání 1. a 2. měření maximální tepelné sráživosti PP multifilu bez zákrutu

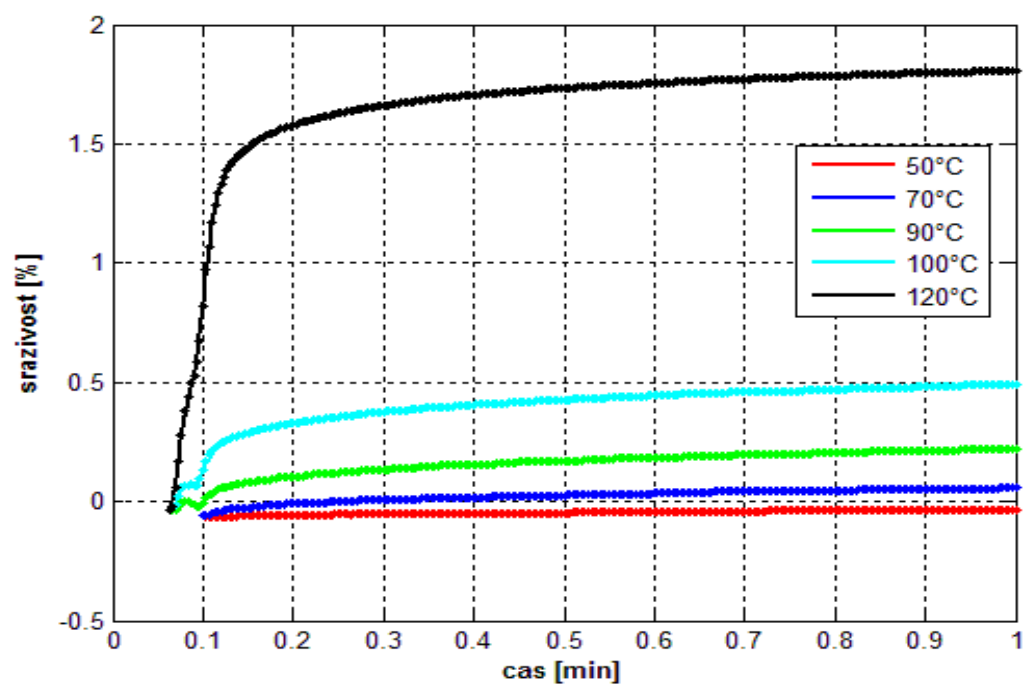


Obr. 2 Porovnání zbytkové tepelné sráživosti 1. a 2. měření PP multifilu bez zákrutu

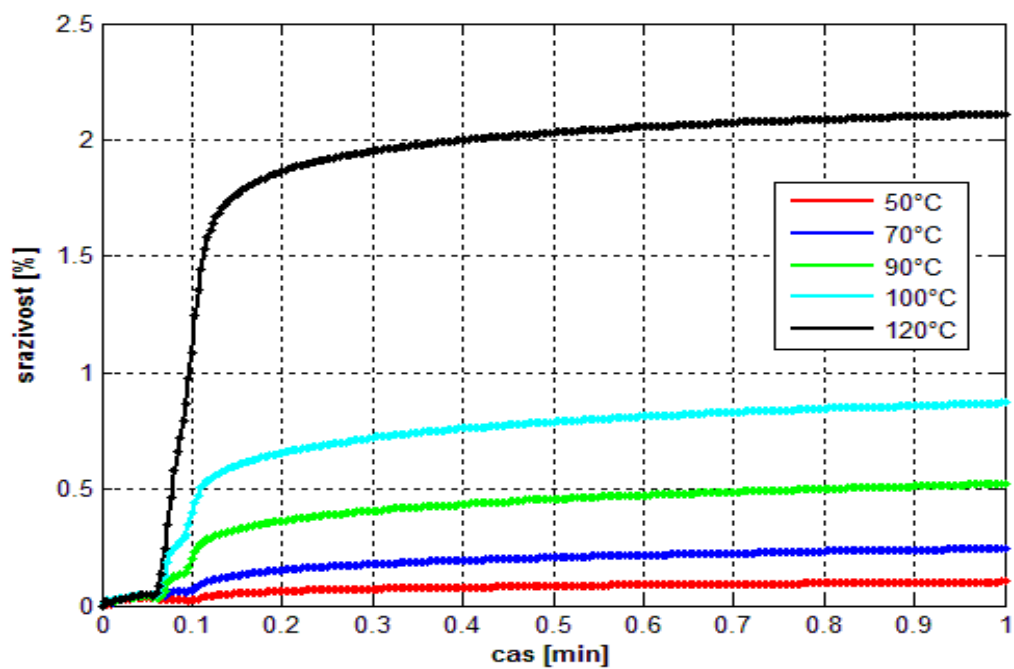




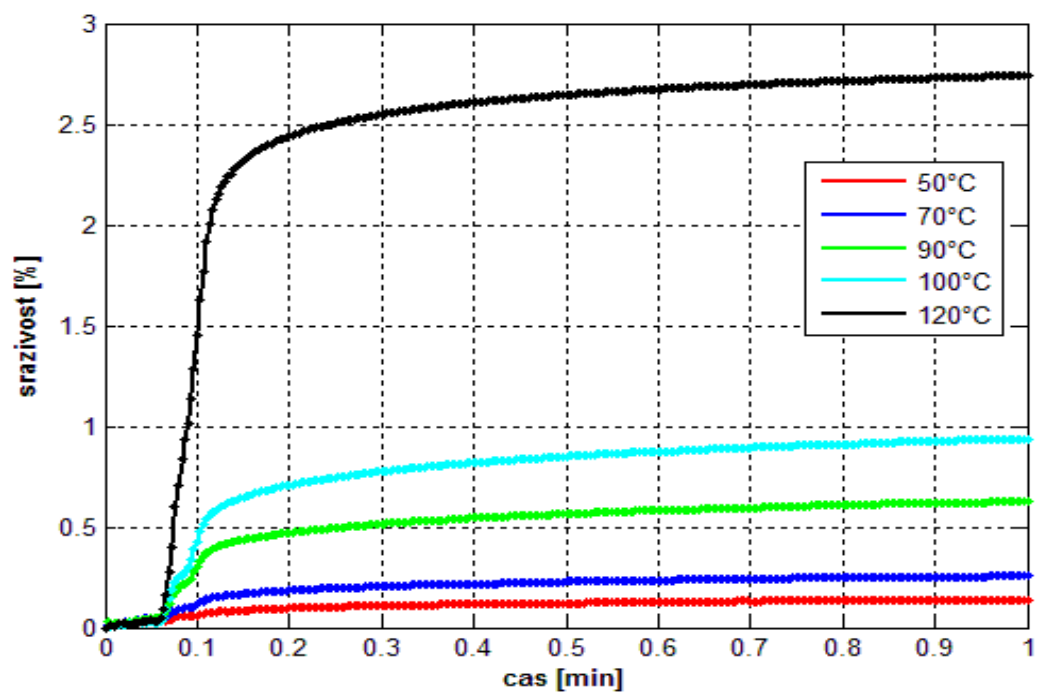
Obr. 3 Kinetické křivky sráživosti PP multifilu bez zákrutu při daných teplotách



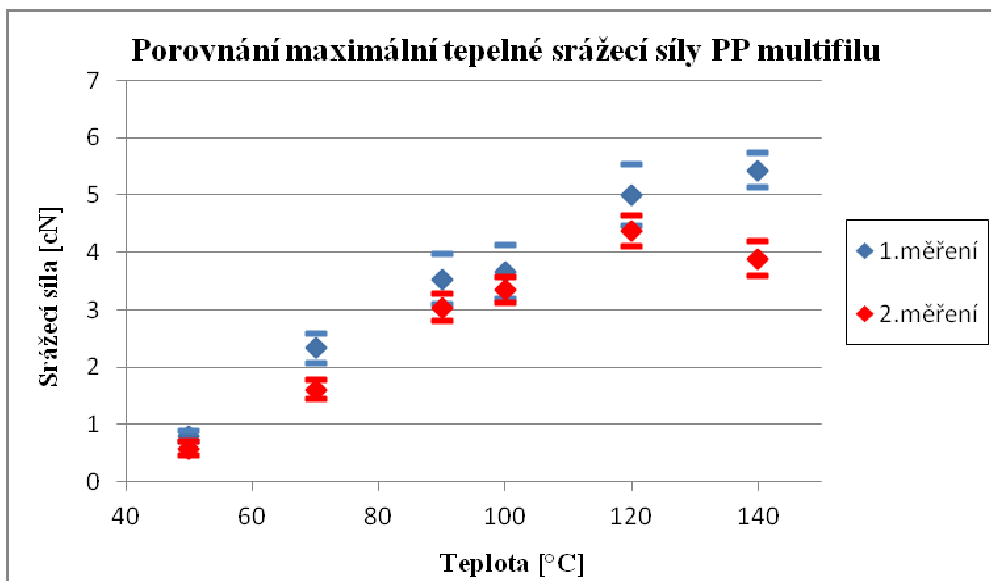
Obr. 4 Kinetické křivky sráživosti PP multifilu se zákrutem 100 ot./m při daných teplotách



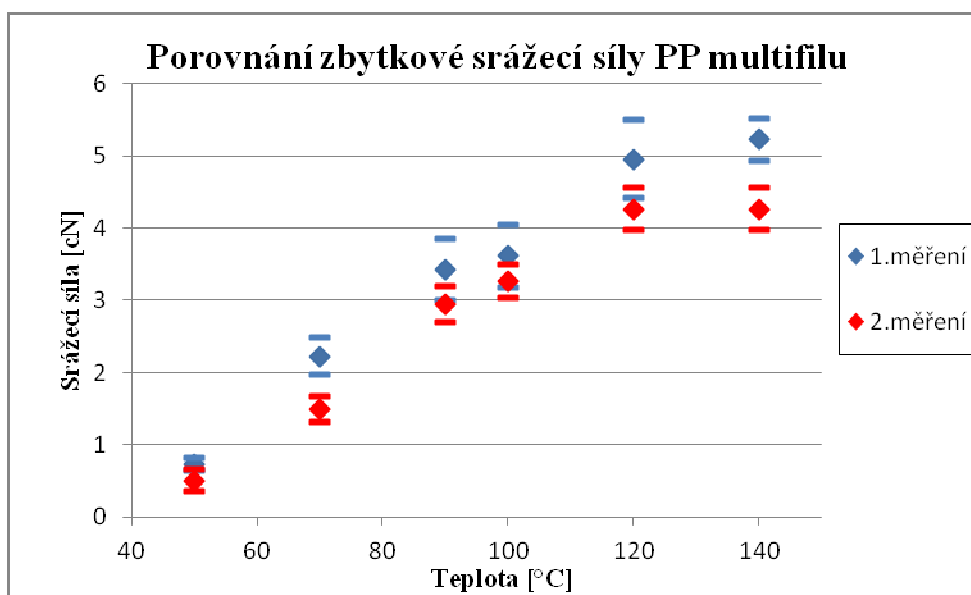
Obr. 5 Kinetické křivky sráživosti PP multifilu se zákrutem 400 ot./m při daných teplotách



Obr. 6 Kinetické křivky sráživosti PP multifilu se zákrutem 800 ot./m při daných teplotách



Obr. 7 Porovnání maximální tepelné srážecí síly 1. a 2. měření polypropylenového multifilu bez zákrutu



Obr. 8 Porovnání zbytkové srážecí síly 1. a 2. měření PP multifilu bez zákrutu

## PŘÍLOHA č.2: DMT

Tab. 6.2.1 Lineární regrese PP multifilu bez zákrutu na daném předpětí

11 g	21 g	31 g	41 g	51 g	61 g	71 g	81 g	91 g
3,445455	3,663636	4,254545	4,109091	3,909091	3,945455	4	4,290909	4,4
3,445455	3,909091	4,009091	3,936364	4,081818	4,145455	4,154545	3,2	4,127273
3,609091	3,627273	3,845455	3,936364	4	3,909091	3,618182	4,263636	4,1

3,654545	3,972727	3,918182	3,936364	4	4,209091	4	3,890909	3,854545
3,609091	3,709091	3,336364	4,145455	3,781818	4,045455	3,945455	3,918182	4,390909
3,463636	3,790909	4,027273	4,009091	4,045455	4,245455	4,218182	4,127273	4
3,472727	3,536364	3,836364	4,127273	4,118182	4,072727	4,090909	4,036364	4,218182
3,536364	3,572727	4,045455	4	3,809091	4,136364	3,818182	4,245455	4,218182
3,836364	3,881818	3,836364	4	4,045455	3,918182	4,181818	3,809091	4,227273
3,554545	3,709091	4,009091	3,963636	4,136364	4,109091	4	3,9	4,018182

Tab. 6.2.2 Lineární regrese PP multifilu se zákrutem 100 ot./m na daném předpětí

11 g	21 g	31 g	41 g	51 g	61 g	71 g	81 g	91 g
3,763636	3,809091	3,845455	3,854545	3,836364	3,863636	3,818182	3,709091	3,763636
3,472727	3,854545	3,881818	3,872727	3,745455	3,936364	3,745455	3,863636	3,763636
3,609091	3,863636	3,836364	3,827273	3,9	3,881818	3,781818	3,772727	3,727273
3,718182	3,790909	3,818182	3,781818	3,836364	3,863636	3,863636	3,745455	3,763636
3,690909	3,9	3,854545	3,781818	3,954545	3,836364	3,790909	3,763636	3,927273
3,827273	3,863636	3,9	3,872727	3,918182	3,963636	3,754545	3,790909	2,654545
3,718182	3,990909	3,845455	3,9	3,827273	3,872727	3,781818	3,763636	3,827273
3,736364	3,845455	3,836364	3,827273	3,863636	3,872727	3,763636	3,718182	3,872727
3,690909	3,8	3,881818	3,872727	3,936364	3,790909	3,836364	3,827273	3,872727
3,627273	3,872727	3,827273	3,890909	3,809091	3,890909	3,809091	3,754545	3,7
3,809091	3,954545	3,809091	3,936364	3,754545	3,790909	3,809091	3,872727	3,709091
3,654545	3,872727	3,836364	3,872727	3,754545	3,763636	3,836364	3,854545	3,809091
3,690909	3,918182	3,863636	3,872727	3,909091	3,909091	3,827273	3,845455	3,790909
3,809091	3,918182	3,827273	3,909091	3,863636	3,909091	3,854545	3,890909	3,863636
3,763636	3,963636	3,936364	3,909091	3,790909	3,918182	3,827273	3,781818	3,818182
3,7	3,863636	3,809091	3,827273	3,790909	3,836364	3,863636	3,890909	3,863636
3,663636	3,909091	3,827273	3,872727	3,818182	3,890909	3,818182	3,872727	4
3,809091	3,918182	3,863636	3,881818	3,763636	3,863636	3,754545	3,890909	3,781818
3,790909	4,036364	3,781818	3,936364	3,845455	3,954545	3,727273	3,854545	3,827273
3,736364	3,863636	3,8	3,809091	3,854545	3,936364	3,7	3,8	3,881818

Tab. 6.2.3 Lineární regrese PP multifilu se zákrutem 400 ot./m na daném předpětí

11 g	21 g	31 g	41 g	51 g	61 g	71 g	81 g	91 g
3,745455	3,863636	3,890909	3,872727	3,954545	3,963636	3,972727	4,036364	3,845455
3,872727	3,854545	4,081818	4,054545	3,936364	3,918182	4	3,972727	3,827273
3,781818	3,890909	4,036364	4,009091	3,927273	3,872727	4	4,081818	3,936364
3,781818	3,909091	3,936364	4,045455	3,927273	3,9	4	3,954545	3,927273
3,727273	3,918182	3,981818	3,972727	3,909091	3,890909	3,954545	4	3,845455
3,727273	3,872727	4,090909	3,936364	3,918182	3,954545	4	4,036364	3,818182
3,718182	3,954545	3,890909	3,954545	3,972727	3,890909	3,972727	4	3,954545

3,709091	3,981818	3,927273	3,981818	3,954545	3,890909	4	3,981818	3,963636
3,745455	3,9	4,063636	3,836364	3,981818	3,927273	4	4	3,927273
3,745455	3,836364	4,036364	3,918182	3,918182	3,845455	4	3,954545	3,972727
3,6	3,890909	3,990909	3,972727	3,954545	3,945455	4,027273	3,909091	3,954545
3,718182	3,918182	3,954545	3,954545	3,954545	3,890909	4,081818	3,954545	3,954545
3,763636	3,836364	3,963636	3,954545	3,854545	3,872727	4,027273	4,036364	4
3,790909	3,863636	4,027273	3,9	3,9	3,872727	3,918182	4,009091	3,918182
3,763636	3,863636	4	3,918182	3,890909	3,972727	4,063636	4,036364	3,945455
3,809091	3,936364	3,990909	4	3,936364	3,845455	3,954545	3,990909	3,954545
3,845455	3,827273	3,890909	4,027273	3,936364	3,872727	4,018182	3,954545	3,954545
3,781818	3,936364	4,018182	3,972727	3,909091	3,9	4	3,927273	3,963636
3,718182	3,881818	3,990909	3,954545	4,027273	3,890909	4,045455	3,954545	3,963636
3,790909	3,918182	4,027273	4	3,972727	3,918182	3,954545	3,972727	4,018182

Tab. 6.2.4 Lineární regrese PP multifilu se zákrutem 800 ot./m na daném předpětí

11 g	21 g	31 g	41 g	51 g	61 g	71 g	81 g	91 g
3,872727	3,981818	4,027273	3,990909	4,036364	4,072727	3,9	3,809091	3,918182
3,945455	4,081818	3,990909	4	4,045455	4,072727	3,9	3,845455	3,909091
3,872727	3,963636	4,009091	4	4	4,018182	3,954545	4	3,954545
3,9	4,063636	4,045455	3,909091	4,072727	4,045455	3,954545	4,145455	3,872727
3,936364	4,036364	4,054545	3,981818	4,1	4,036364	3,936364	4,036364	3,836364
3,781818	3,963636	3,954545	3,963636	4,081818	4,045455	3,981818	3,836364	3,890909
3,854545	4	77	4,072727	4,072727	4,081818	3,945455	3,963636	4
3,927273	4	3,9	4,081818	4,072727	4	3,9	4,036364	4
3,836364	4	4,090909	4,045455	4,081818	3,954545	3,954545	3,890909	3,927273
3,909091	3,990909	3,963636	3,954545	4,036364	4,072727	4,036364	3,954545	4
3,881818	4,063636	3,927273	4,018182	4,036364	4,036364	4	4	3,872727
3,918182	3,954545	3,918182	4,063636	4	4,063636	3,909091	3,945455	3,863636
4,036364	3,990909	3,618182	4,127273	3,954545	3,990909	4,081818	3,918182	3,945455
3,936364	4,009091	4,027273	4,036364	4,109091	3,954545	3,954545	4,127273	3,954545
3,863636	4,027273	4	4,127273	4,036364	4,136364	3,972727	4,145455	3,954545
3,918182	3,954545	4	3,963636	4,063636	4,072727	3,918182	3,963636	3,909091
3,945455	3,9	4,081818	4,172727	4,136364	4,081818	3,918182	4,081818	3,890909
3,927273	4,127273	4,009091	4,081818	4,081818	3,927273	4,054545	3,954545	4,054545
3,909091	4,045455	4,054545	4,009091	3,972727	4,027273	3,981818	3,945455	3,818182
3,872727	4,045455	4,063636	4,027273	3,990909	4,190909	4,027273	3,963636	3,918182

Tab. 6.2.4 Lineární regrese PP monofilu bez zákrutu na daném předpětí

11 g	21 g	31 g	41 g	51 g	61 g	71 g
3,372727	3,3	3,463636	3,327273	3,263636	3,218182	3
3,372727	3,372727	3,381818	3,5	3,209091	3,181818	3,045455
3,418182	3,318182	3,445455	3,372727	3,309091		3,018182

3,427273	3,390909		3,390909	3,281818	3,181818	3,154545
3,381818	3,536364	3,509091	3,354545	3,281818	3,172727	3,127273
3,327273	3,427273	3,436364			3,127273	3,181818
3,327273	3,627273	3,454545	3,327273	3,236364	3,254545	3,181818
3,263636	3,4		3,2	3,263636	3,172727	2,809091
3,190909	3,418182	3,445455	3,281818	3,181818		3,009091
3,172727	3,518182	3,427273	3,263636	3,190909	3,181818	3,254545

Tab. 6.2.5 Výpočet modulu [MPa] pro PP multifil bez zákrutu

$\rho * C^2$	Střední hodnota :	Spodní mez (5%) :	Horní mez (95%) :
11g	11380,34	10895,99	11875,22
21g	12827,92	11934,35	13753,74
31g	14067,87	13362,45	14791,42
41g	14725,92	14071,97	15394,74
51g	14526,93	13877,45	15191,26
61g	14892,79	14132,6	15672,89
71g	14926,28	14131,1	15743,21
81g	15060,59	13718,96	16464,8
91g	15467,16	14657,52	16298,57

Tab. 6.2.6 Výpočet modulu [MPa] pro PP multifil se zákrutem 100 ot./m

$\rho * C^2$	Střední hodnota :	Spodní mez (5%) :	Horní mez (95%) :
11g	12642,23	12352,95	12934,86
21g	13744,48	13593,21	13896,58
31g	13424,85	13317,98	13532,14
41g	13584,19	13412,4	13757,08
51g	13456,64	13200,58	13715,17
61g	13680,25	13486,37	13875,51
71g	13108,98	12919,21	13300,14
81g	13266,45	13012,2	13523,15
91g	13266,45	13012,2	13523,15

Tab. 6.2.7 Výpočet modulu [MPa] pro PP multifil se zákrutem 400 ot./m

$\rho * C^2$	Střední hodnota :	Spodní mez (5%) :	Horní mez (95%) :
11g	12827,92	12660,99	12995,94
21g	13776,65	13646,79	13907,13
31g	14460,9	14217,43	14706,43
41g	14263,7	14065,72	14463,07
51g	14067,87	13958,46	14177,7
61g	13841,1	13710,93	13971,88

71g	14560	14426,49	14694,13
81g	14526,93	14327,12	14728,12
91g	14133	14023,34	14243,08

Tab. 6.2.8 Výpočet modulu [MPa] pro PP multifil se zákrutem 800 ot./m

$\rho * C^2$	Střední hodnota :	Spodní mez (5%) :	Horní mez (95%) :
11g	13873,38	13721,4	14026,2
21g	14593,11	14392,84	14794,76
31g	14593,11	14348,53	14839,76
41g	14792,56	14546,3	15040,88
51g	14859,34	14657,25	15062,82
61g	14825,93	14646,43	15006,53
71g	14263,7	14065,72	14463,07
81g	14395,02	14108,16	14684,75
91g	13938,06	13742,36	14135,15

Tab. 6.2.9 Výpočet modulu [MPa] pro PP monofil bez zákrutu

$\rho * C^2$	Střední hodnota :	Spodní mez (5%) :	Horní mez (95%) :
11g	10046,87	9676,565	10424,13
21g	10802,75	10330,99	11285,05
31g	10802,75	10696,07	10909,96
41g	10074,38	9699,184	10456,69
51g	9585,007	9291,735	9882,837
61g	9291,946	9168,379	9416,34
71g	8719,473	8217,969	9235,83

Tab. 6.2.10 Výpočet orientace [-] pro PP multifil bez zákrutu

$f\alpha = 1 - Cn^2 / C^2$	Střední hodnota :	Spodní mez (5%) :	Horní mez (95%) :
11g	0,795296	0,786197	0,803827
21g	0,818396	0,804799	0,830621
31g	0,834403	0,825661	0,842503
41g	0,841803	0,834451	0,848676
51g	0,839636	0,832131	0,846649
61g	0,843575	0,835161	0,851361
71g	0,843926	0,835144	0,852025
81g	0,845318	0,830191	0,85851
91g	0,849384	0,841064	0,857067

Tab. 6.2.11 Výpočet orientace [-] pro PP multifil se zákrutem 100 ot./m

$f\alpha = 1 - Cn^2 / C^2$	Střední hodnota :	Spodní mez (5%) :	Horní mez (95%) :
----------------------------	-------------------	-------------------	-------------------

11g	0,815729	0,811413	0,819898
21g	0,830506	0,82862	0,832362
31g	0,826471	0,825079	0,827847
41g	0,828507	0,82631	0,830662
51g	0,826881	0,823523	0,830144
61g	0,829711	0,827263	0,832107
71g	0,82229	0,819679	0,824844
81g	0,824399	0,820968	0,827732
91g	0,824399	0,820968	0,827732

Tab. 6.2.12 Výpočet orientace [-] pro PP multifil se zákrutem 400 ot./m

$f\alpha = 1 - Cn^2 / C^2$	Střední hodnota :	Spodní mez (5%) :	Horní mez (95%) :
11g	0,818396	0,816002	0,820744
21g	0,830902	0,829293	0,832489
31g	0,838903	0,836145	0,841593
41g	0,836676	0,834377	0,838928
51g	0,834403	0,833105	0,835686
61g	0,83169	0,830092	0,833265
71g	0,84	0,838519	0,84146
81g	0,839636	0,837399	0,841826
91g	0,835166	0,833877	0,83644

Tab. 6.2.13 Výpočet orientace [-] pro PP multifil se zákrutem 800 ot./m

$f\alpha = 1 - Cn^2 / C^2$	Střední hodnota :	Spodní mez (5%) :	Horní mez (95%) :
11g	0,832081	0,830221	0,833911
21g	0,840363	0,838142	0,842539
31g	0,840363	0,837642	0,843016
41g	0,842515	0,839849	0,845115
51g	0,843223	0,841062	0,845341
61g	0,84287	0,840944	0,844761
71g	0,836676	0,834377	0,838928
81g	0,838166	0,834876	0,841359
91g	0,832861	0,83048	0,835191

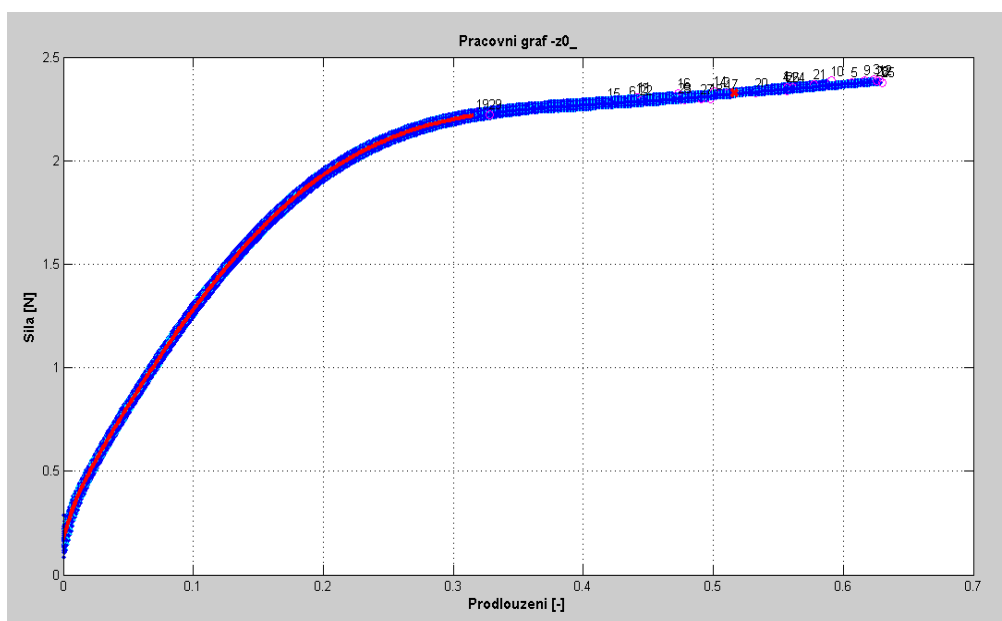
Tab. 6.2.14 Výpočet orientace [-] pro PP monofilu bez zákrutu

$f\alpha = 1 - Cn^2 / C^2$	Střední hodnota :	Spodní mez (5%) :	Horní mez (95%) :
11g	0,768127	0,759253	0,776518
21g	0,784351	0,774504	0,793568
31g	0,784351	0,7822	0,78647
41g	0,76876	0,759815	0,777214
51g	0,756954	0,749283	0,764278

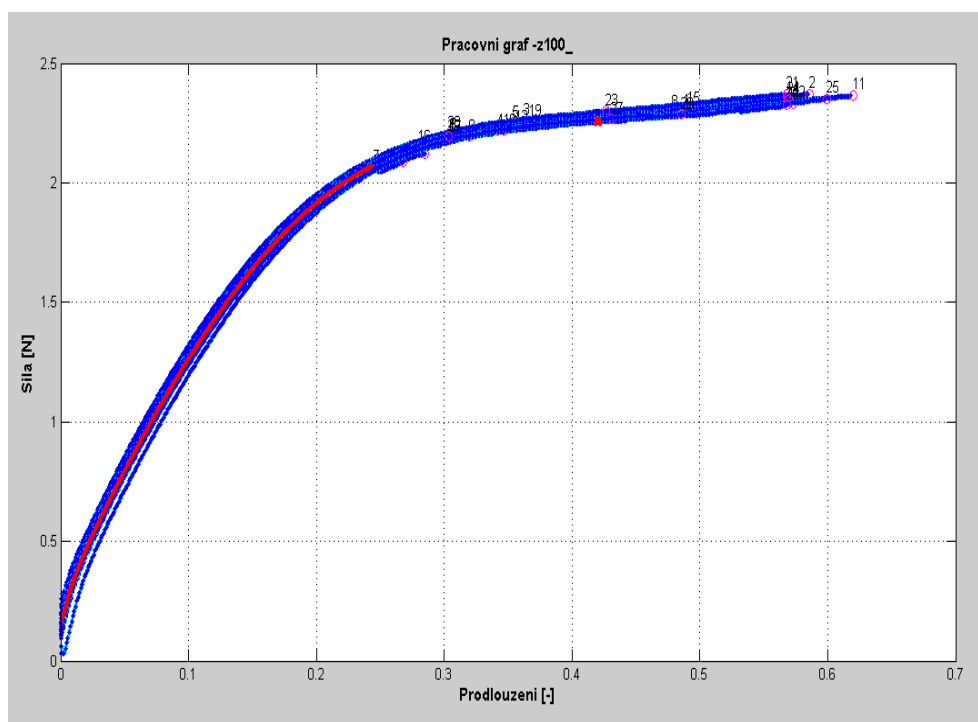


61g	0,749288	0,745909	0,7526
71g	0,732828	0,716524	0,747765

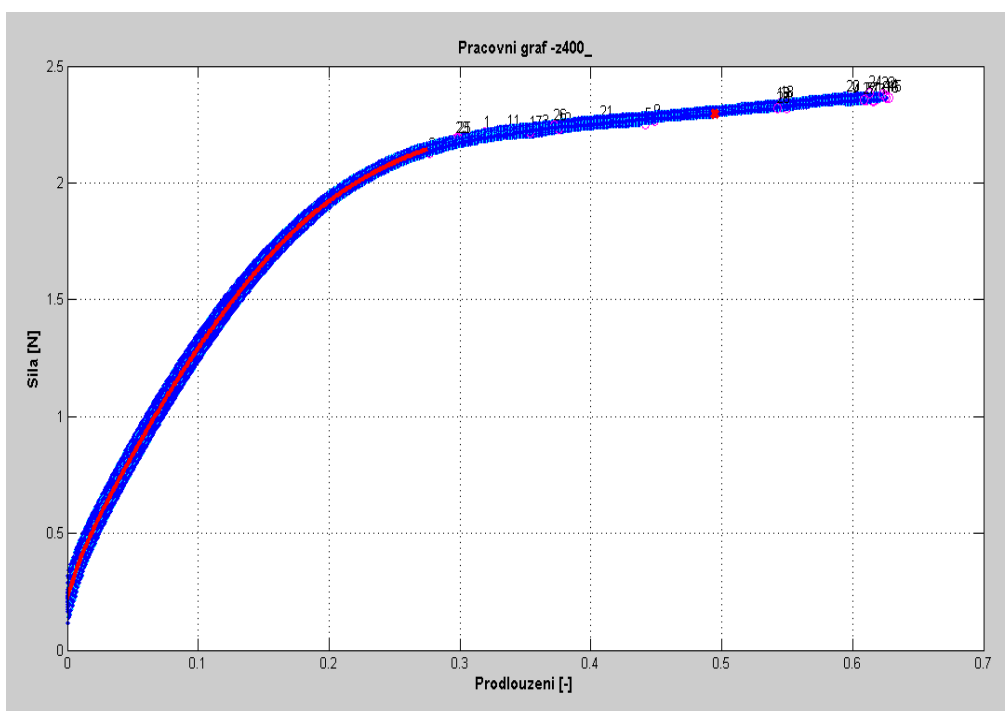
### PŘÍLOHA č.3: INSTRON 4411



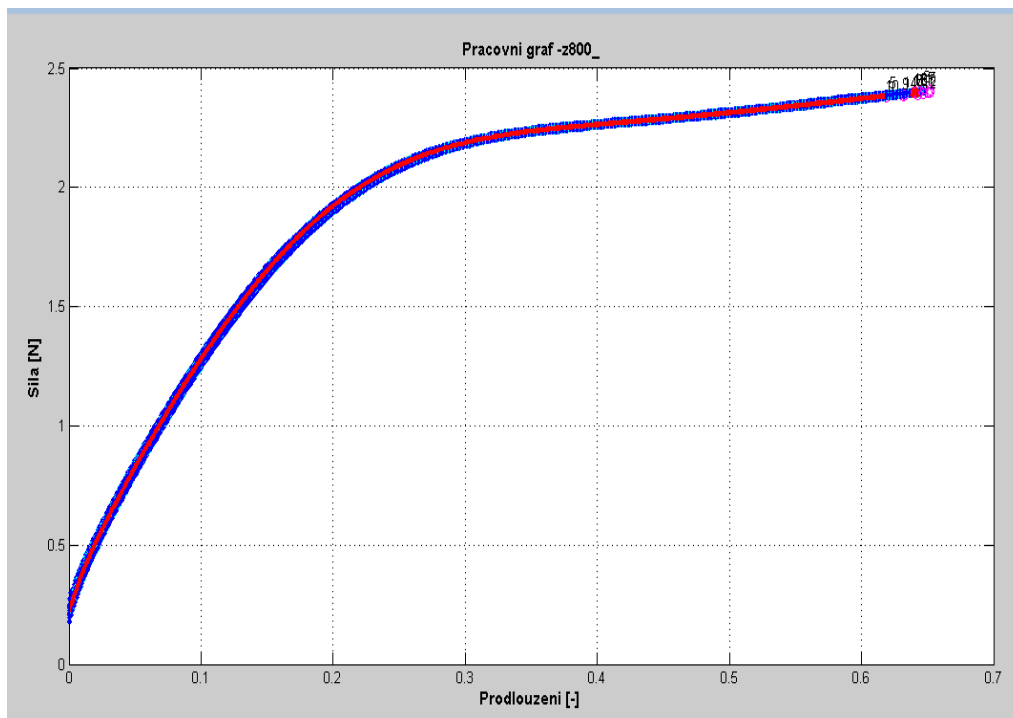
Obr. 6.3.1 Tahová křivka PP multifilu bez zákrutu



Obr. 6.3.2 Tahová křivka PP multifilu se zákrutem 100 ot./m



Obr. 6.3.3 Tahová křivka PP multifilu se zákrutem 400 ot./m



Obr. 6.3.4 Tahová křivka PP multifilu se zákrutem 800 ot./m

**Tabulka hodnot ( DMT, Instron)**

Počet otáček na metr n	0	100	400	800
Síla [N]	2,33	2,256897	2,297857	2,396471
Spodní mez	2,312598	2,224844	2,269395	2,39204
Horní mez	2,347402	2,28895	2,326319	2,400901
Poměrná pevnost[N/tex]	0,41982	0,406648	0,414028	0,431797
Spodní mez	0,416684	0,400873	0,4089	0,430998
Horní mez	0,422955	0,412423	0,419157	0,432595
Síla[Mpa]	390,0623	377,6982	382,7579	394,1693
Spodní mez	387,1492	372,3341	378,0169	393,4405
Horní mez	392,9755	383,0624	387,4989	394,898
Tažnost [%]	78,01247	75,53965	76,55159	78,83385
Spodní mez	77,42983	74,46681	75,60338	78,6881
Horní mez	78,5951	76,61248	77,49979	78,97961
Modul [Mpa]	1427	1436	1385	1387
Modul [N]	8.5209	8.5812	8.3145	8.4341
Akustický modul [Mpa]	14526,93	13456,64	14067,87	14859,34

